МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

А. С. КУЗНЕЦОВ

Надежность радиолюбительской аппаратуры



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 688

А. С. КУЗНЕЦОВ

НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЛЮБИТЕЛЬСКОЙ АППАРАТУРЫ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1969

К 89
УДК 621.37/39.019.3

Кузнецов А. С.

К 89 Надежность радиолюбительской аппаратуры М., «Энергия», 1969.

48 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 688)

Брошюра знакомит радиолюбителей с основными методами повышения надежности радиоаппаратуры. Даны рекомендации по выбору режимов работы радиоэлементов и деталей, используемых в радиолюбительских конструкциях.

Содержит графический и иллюстрационный материал, позволяющий радиолюбителям самостоятельно решать ряд задач по обеспечению надежности разрабатываемых радиоустройств.

Рассчитана на широкий круг радиолюбителей-конструкторов.

3-4-5
342-68

Кузнецов Альфред Степанович

Надежность радиолюбительской аппаратуры

Редактор *А. И. Перроте*

Технический редактор *О. Д. Кузнецова* Корректор *З. Б. Шлайфер*

Сдано в набор 5/VII 1968 г. Подписано к печати 18/XII 1968 г. Т-17436
Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,52 Уч.-изд. л. 3,11
Тираж 50 000 экз. Цена 13 коп. Зак. 1367

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема надежности радиоэлектронной аппаратуры является, пожалуй, одной из самых молодых проблем современной системотехники. Первые исследования в этой области относятся к пятидесятым годам. Несмотря на это можно с уверенностью утверждать, что в настоящее время сложилась специальная дисциплина, занимающаяся вопросами построения надежных радиоэлектронных систем, способствующая наряду с другими дисциплинами успешному развитию радиоэлектроники.

Проблема надежности возникла как неизбежное следствие роста сложности радиоэлектронных устройств и повышения требований к их техническим параметрам, в том числе к точности их функционирования. Стремление обеспечить наилучшие значения технических параметров при наименьших весах и габаритах приводило к тому, что в каскадах и схемах аппаратуры функции различных элементов совмещались в минимальном числе деталей, детали работали в предельных электрических и тепловых режимах и при этом уход технического параметра почти любого элемента схемы вызывал нарушение нормального функционирования всей аппаратуры. Наряду с этим постепенно возникающими нарушениями работоспособности наблюдались пробои конденсаторов, изоляторов, межэлектродные замыкания ламп, внезапно выводившие аппаратуру из строя, тем более частые, чем большее количество таких элементов имелось в аппаратуре.

Все это очень усложняло как процесс разработки, так и процесс эксплуатации сложных систем.

Анализ причин отказов, помимо чисто технических трудностей, осложнялся еще и тем, что моменты возникновения отказов были случайными, не совпадали между собой у различных образцов однотипной аппаратуры и не позволяли, на первый взгляд, выявить какие-либо закономерности. Исследование элемента случайности, присущего процессам возникновения отказов, потребовало привлечения специального математического аппарата теории вероятностей и математической статистики.

В настоящее время теория надежности, созданная на базе математического аппарата теории вероятностей, способна решать целый ряд практических задач конструирования и эксплуатации сложных систем, а накопленный в практике надежности опыт и анализ физических процессов, протекающих в аппаратуре, позволяет сформулировать некоторые важные принципы разработки надежных радиосхем и аппаратуры в целом.

Данная брошюра имеет своей целью ознакомить радиолюбителей с основными понятиями и принципами построения надежной радиоаппаратуры. Здесь, однако, следует иметь в виду, что возможности конструктора, разрабатывающего серийную аппаратуру в условиях налаженной технологии производства, и радиолюбителя, создающего, как правило, единственный образец, резко отличаются. Конструктор располагает мощной экспериментальной базой, к его услугам оборудованная лаборатория типовых испытаний, он в состоянии осуществить любой эксперимент по выявлению характеристик надежности аппаратуры. Радиолюбитель не в состоянии экспериментировать в области надежности. Однако некоторые меры он может предусмотреть заранее, еще в процессе обработки схемы и подбора элементов. Знание основ теории и практики надежности позволит радиолюбителям более квалифицированно подходить к вопросам конструирования аппаратуры, расширить технический кругозор.

Редактор

НАДЕЖНОСТЬ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Проблема обеспечения надежности чрезвычайно широка и охватывает все стадии разработки и конструирования аппаратуры. Конечная цель любой радиолюбительской работы — это создание аппаратуры, способной выполнить присущие ей функции и удовлетворяющей определенным требованиям. Однако нередки случаи, когда хорошо выполненная конструкция выходит из строя даже при незначительном изменении рабочих параметров (например, при повышении напряжения питания на 10—15% от номинального).

Большинство неисправностей электронной аппаратуры носит случайный характер и обусловлено различными трудноучитываемыми факторами, такими как влажность, температура окружающей среды, удары, вибрация, несовершенство технологических процессов, неоднородности в материалах и др.

Так как предсказать заранее появление и степень влияния указанных факторов на процесс нормального функционирования аппаратуры можно лишь с определенной степенью достоверности, в теории надежности используется математический аппарат теории вероятностей, позволяющий найти характеристики надежности аппаратуры.

Долгое время надежность была чисто качественным, условно подразумеваемым понятием, не поддающимся количественному определению и расчету. Это не позволяло сравнивать различные схемы и конструкции по надежности их действия и определять как то или иное схемное или конструктивное решение влияет на надежность работы данного прибора.

В настоящее время этому понятию придают вполне конкретную количественную оценку.

Для лучшего понимания дальнейшего дадим следующие определения.

А п п а р а т у р о й называется совокупность определенного числа элементов, необходимых для выполнения заданных функций и соединенных между собой по определенной схеме.

Э л е м е н т о м называется часть аппаратуры, состоящая из какой-либо одной или нескольких деталей и выполняющая определенные функции в схеме (электронная лампа, транзистор, конденсатор, переключатель, реле и т. п.).

Комплектующими элементами называются простейшие элементы электронных схем, выпускаемые промышленностью (лампы, резисторы, конденсаторы, ламповые панели и т. п.), не способные сами по себе, т. е. без подключения других элементов, выполнять задачи по преобразованию сигналов.

Блоком называется функциональное законченное устройство, позволяющее получить на выходе заданные физические величины (выпрямитель, электронный стабилизатор, блок контроля, блок УПЧ и т. д.).

Системой (с точки зрения надежности) называется совокупность блоков или любое состоящее из элементов устройство, обеспечивающее на выходе комплекс заданных величин, надежность которого имеет самостоятельное значение (например, отдельные функциональные узлы, блоки, станции, несколько установок, объединенных для выполнения определенных функций).

Надежность — это свойство аппаратуры (элемента, блока или системы) выполнять заданные функции и при этом сохранять свои параметры (работоспособность) в заданных пределах, в заданных условиях эксплуатации, в течение определенного промежутка времени.

Наиболее кратко надежность можно определить как способность аппаратуры не отказывать в работе.

Работоспособностью называется состояние аппаратуры (элемента, системы), при котором она в данный момент времени соответствует всем требованиям, установленным в отношении ее основных параметров, и способна выполнять заданные функции.

Отказом называется полная или частичная утрата работоспособности аппаратурой (элементом, блоком, системой), а также выход рабочих параметров за пределы допустимых значений.

Последовательным соединением (в смысле надежности) называется такое соединение, при котором отказ любого элемента или блока приводит к отказу блока или системы в целом.

Параллельным соединением элементов (с точки зрения надежности) называется такое соединение, при котором отказ исследуемой системы наступит тогда и только тогда, когда откажут все параллельно соединенные элементы.

Старение аппаратуры — процесс постепенного и непрерывного изменения ее параметров, вызываемый действием старения материалов и другими процессами, наличие которых не зависит от режима работы (аналогично для элемента).

Изнашивание аппаратуры — процесс постепенного изменения параметров аппаратуры, вызываемый действием механических, электрических, тепловых и других нагрузок, наличие которых определяется только режимом работы.

Ресурс — время, в течение которого элемент (или аппаратура) работает безотказно в данном режиме эксплуатации.

Коэффициент нагрузки $K_н$ — отношение рабочей нагрузки, действующей на систему (элемент), к номинальной (установленной стандартами, инструкциями и другими документами) при определенных условиях эксплуатации.

Дадим теперь элементарное представление о вероятности. Мы уже отмечали, что отказ — это событие случайное. В теории вероятностей под случайным событием понимается событие, которое может произойти в опыте, а может и не произойти, причем заранее нельзя указать, в каком опыте событие произойдет, а в каком нет. Количественной характеристикой случайности события является его вероятность (P), вычисляемая как отношение числа опытов (m), при которых событие имело место, к общему числу производимых

опытов (n) при условии, что оно достаточно велико. Математически это определение записывается так:

$$P = \lim_{n \to \infty} \frac{m}{n}.$$

Применительно к надежности отсюда сразу вытекает ее основной количественный критерий — *вероятность безотказной работы* $P(t)$ в течение заданного времени t. Допустим, мы наблюдаем за работой некоторого устройства в течение длительного времени и нас интересует вероятность того, что за время t значительно меньшее, чем время наблюдения, это устройство не откажет. Разобьем весь отрезок времени наблюдения на n интервалов длительностью t каждый и будем фиксировать те из них, в которых имели место отказы. Время, затраченное на ремонт устройства после имевших место отказов, будем из наблюдения исключать, так же как и время, которое после отказа осталось до конца интервала. В результате такого опыта мы получим число интервалов m, в которых наблюдались отказы, и число интервалов $n—m$, в которых отказов не было. Разделив $n—m$ на n, мы получим при достаточно большом n оценку вероятности безотказной работы устройства за время t:

$$P(t) = \frac{n - m}{n}.$$

Если мы разделим m на n, то получится *вероятность отказа устройства* за время t:

$$Q(t) = \frac{m}{n}.$$

Нетрудно видеть, что сумма вероятностей отказа и безотказной работы равна единице, т. е.

$$P(t) + Q(t) = \frac{n - m}{n} + \frac{m}{n} = 1.$$

Полученные оценки вероятностей отказа и безотказной работы будут тем точнее, чем больше n.

Для элементов аппаратуры, поскольку их нельзя отремонтировать в процессе эксплуатации, вероятность безотказной работы может быть оценена по совокупности n образцов, поставляемых на испытание в течение времени t. Число элементов, не отказавших к концу испытаний, поделенное на общее число поставленных и даст оценку вероятности безотказной работы.

Аналогичным образом определяется *коэффициент готовности* $K_г$ — вероятность того, что данная аппаратура будет работоспособна в любой произвольно выбранный момент времени. Этот критерий относится только к аппаратуре, которая в процессе эксплуатации может подвергаться кратковременному ремонту. Для аппаратуры, условия эксплуатации которой не позволяют осуществлять даже мелкий ремонт, этот критерий не имеет смысла.

Вероятность безотказной работы является функцией времени t, и в общем случае ее определение для любого интервала t представляет значительные затруднения. Однако для сложной аппаратуры, содержащей большое количество различных элементов, зачастую оказывается достаточным знать величину средней *наработки* на отказ T_0. Физический смысл этого количественного критерия надежности сводится к следующему. Интервалы времени τ между двумя соседними отказами являются случайными величинами. До-

пустим, мы наблюдаем за работой некоторого устройства в течение длительного времени, фиксируем моменты отказов и вычисляем значение τ наработки на отказ, как разности между моментами наступления соседних отказов за вычетом времени, затраченного на ремонт. В результате мы получим последовательность случайных величин $\tau_1, \tau_2, \ldots, \tau_n$. Их среднее значение при условии, что n достаточно велико:

$$T_0 = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \ldots + \tau_n}{n}, \ ч, \qquad (1)$$

называется *средней наработкой на отказ.*

В тех случаях, когда средняя наработка на отказ может быть использована как количественный критерий надежности, часто применяют обратную величину

$$\lambda = \frac{1}{T_0}, \ 1/ч. \qquad (2)$$

Эта величина называется *интенсивностью отказов* и характеризует собой в данном случае среднее число отказов в единицу времени. Заметим, что в общем случае величина интенсивности отказов не остается постоянной во времени и тогда пользоваться соотношениями (1) и (2) в качестве критериев надежности нельзя.

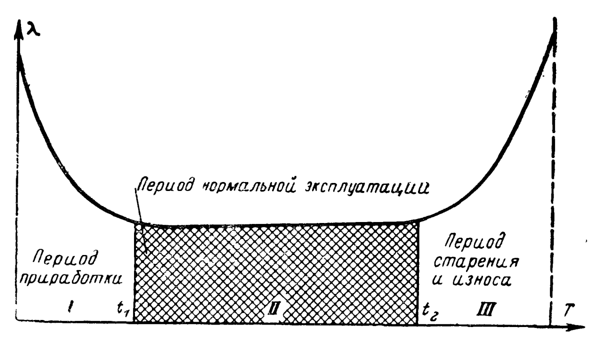


Рис. 1. Зависимости интенсивности отказов элементов от времени.

В большинстве случаев зависимость $\lambda(t)$ имеет характерный вид, представленный на рис. 1. Из этой кривой видно, что в работе аппаратуры можно выделить три участка. На участке от 0 до t_1 интенсивность отказов резко уменьшается. Это объясняется наличием большого числа отказов аппаратуры вначале эксплуатации по следующим причинам: наличие элементов, имеющих внутренние дефекты, ошибок при конструировании, неудачного монтажа и т. п. Этот участок называется периодом приработки.

Второй участок от t_1 до t_2 характеризуется постоянством интенсивности отказов. Этот участок характеризует нормальную работу аппаратуры и всегда является более длинным, чем участок приработки.

Третий участок, начинающийся за t_2, характеризуется резким ростом интенсивности отказов из-за старения и износа элементов.

Обычно аппаратуру не эксплуатируют до состояния износа.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Наиболее удобной для расчета количественной характеристики надежности элементов является интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Исходя из того, что большую часть срока службы аппаратура работает с элементами, находящимися на этапе нормальной работы (участок t_1—t_2, рис. 1), будем считать интенсивность отказов элементов постоянной, т. е.

$$\lambda(t) = \text{const}.$$

Интенсивности отказов элементов могут отличаться между собой в десятки, сотни и даже тысячи раз. Иногда отказы происходят по причине выхода из строя реле, ЭВП и других сравнительно немногочисленных элементов, иногда аппаратура отказывает из-за перегорания резистора или пробоя конденсатора, т. е. из-за отказов относительно надежных элементов. Это объясняется тем, что указанные элементы применяются в радиоэлектронной аппаратуре в гораздо больших количествах, чем менее надежные элементы, такие, например, как реле. Из сказанного следует, что на надежность аппаратуры влияет не сама по себе интенсивность отказов отдельных элементов, а групповая интенсивность, представляющая собой произведение интенсивности отказов элементов данного типа на их количество — λn.

В случае независимых отказов, т. е. когда случайные отказы различных элементов аппаратуры не влияют друг на друга, появление отказов подчиняется во времени закону Пуассона:

$$P_k(t_{\text{зад}}) = \frac{(t_{\text{зад}}\lambda)^k}{k!} e^{-t_{\text{зад}}\lambda}, \qquad (3)$$

где P_k — вероятность появления точно k отказов за время $t_{\text{зад}}$;
$t_{\text{зад}}$ — заданный интервал времени;
λ — интенсивность отказов элементов (блока, системы), $1/ч$;
k — число отказов за время $t_{\text{зад}}$;
e — основание натуральных логарифмов $\approx 2{,}71828$.

В связи с тем что конструктора радиоаппаратуры интересует вероятность безотказной работы, т. е. наступление нуля отказов за время $t_{\text{зад}}$, формула (3) принимает вид (для $k=0$):

$$P_0(t_{\text{зад}}) = e^{-t_{\text{зад}}\lambda} = e^{-\frac{t_{\text{зад}}}{T_0}}. \qquad (4)$$

Указанное соотношение позволяет определить вероятность того, что элемент (аппаратура, блок, система) безотказно проработает в течение времени $t_{\text{зад}}$.

Следовательно, задача расчета надежности элемента или аппаратуры сводится к нахождению численного значения интенсивности отказов λ и последующему расчету по формуле (4). Нужно заметить, что сказанное справедливо только для нерезервированной аппаратуры.

Интенсивности отказов элементов определяются по специальным таблицам λ-характеристик (см. приложение 2). При этом необходимо учитывать условия эксплуатации рассматриваемых элементов.

Учесть влияние различных факторов, влияющих на надежность радиоаппаратуры, как-то: электрический режим, окружающая тем-

пература, влажность, механические нагрузки и т. п., можно с большей или меньшей степенью точности. Наиболее приближенный, но вполне приемлемый в радиолюбительской практике метод заключается в том, что учитывает воздействие на интенсивность отказов не каждого фактора в отдельности, а совокупности факторов, определяющих данные условия эксплуатации.

Например, условия эксплуатации аппаратуры, смонтированной на автомобиле, будут значительно отличаться от условий эксплуатации той же аппаратуры, находящейся в стационарных условиях.

Эти отличия оцениваются при помощи коэффициента эксплуатации a, который показывает, во сколько раз возрастают интенсивности отказов элементов, входящих в аппаратуру, в данных условиях по сравнению с некоторыми условными (обычно лабораторными), принятыми за начало отсчета. Значения коэффициента эксплуатации a приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия эксплуатации	Значение коэффициента a
Лабораторные	1
Наземная аппаратура	10
Корабельная аппаратура	20
Автомобильная аппаратура	40
Поездная аппаратура	60
Высокогорная аппаратура	80
Самолетная аппаратура	100

Для того чтобы учесть влияние условий эксплуатации на интенсивность отказов элементов при помощи данной таблицы, нужно умножить значение интенсивности отказов, найденное из приложения, на коэффициент, соответствующий выбранным условиям эксплуатации.

Например, конденсатор электролитический имеет среднее значение (лабораторное) интенсивности отказов $\lambda=0{,}035\cdot10^{-6}$ 1/*ч*. Это значит, что средняя интенсивность отказов при эксплуатации конденсатора в наземной аппаратуре (при $a=10$) будет равна:

$$\lambda_1=\lambda a_{\text{наз}}=0{,}035\cdot10^{-6}\cdot10=0{,}35\cdot10^{-6}\ 1/ч,$$

а при эксплуатации в автомобильной аппаратуре

$$\lambda_2=\lambda a_{\text{авт}}=0{,}035\cdot10^{-6}\cdot40=1{,}4\cdot10^{-6}\ 1/ч.$$

В большинстве случаев нет необходимости умножать на выбранный коэффициент эксплуатации значение интенсивностей отказов всех элементов, входящих в аппаратуру. Достаточно рассчитать интенсивность отказов всего устройства по данным приложения, а затем полученное суммарное значение умножить на поправочный коэффициент.

Более точно учесть влияние условий эксплуатации на интенсивность отказов элементов можно путем оценки воздействия каждого фактора в отдельности. По данному методу интенсивность отказов элементов в данных условиях эксплуатации получается путем умно-

жения величины интенсивности отказов элементов при их эксплуатации в номинальных режимах (оговоренных в справочной литературе) на так называемые коэффициенты интенсивности отказов α:

$$\lambda_1 = \lambda\alpha_1\alpha_2\alpha_3, \ \ldots, \ \alpha_n. \qquad (5)$$

Здесь λ — интенсивность отказов элементов при их эксплуатации в номинальных режимах; α_1, α_2, α_3, ..., α_n — эксплуатационные коэффициенты интенсивности отказов, характеризующих влияние различных факторов эксплуатации.

Так как учет влияния всех факторов весьма сложен и требует наличия большого справочного материала, на практике ограничиваются в большинстве случаев учетом влияния температуры и электрического режима.

Эксплуатационные коэффициенты интенсивности отказов представляют графически в зависимости от значений окружающей температуры или электрического режима (рис. 2 — рис. 14).

Эксплуатационные коэффициенты интенсивности отказов в зависимости от электрического режима работы элементов рассчитывают для отношений рабочих напряжений, токов и мощностей к соответствующим номинальным (допустимым) значениям.

Коэффициент нагрузки $k_н$ для различных элементов определяется следующим образом:

Для резисторов всех типов

$$k_н = \frac{P_{раб}}{P_{доп}}, \qquad (6)$$

где $P_{раб}$ — мощность, фактически рассеиваемая на резисторе, *вт*; $P_{доп}$ — допустимая при данных внешних условиях мощность рассеивания (указывается в справочниках), *вт*.

Для конденсаторов всех типов

$$k_н = \frac{u_{р.макс}}{u_{доп.макс}}, \qquad (7)$$

где $u_{р.макс}$ — амплитуда рабочего напряжения, *в*;
$u_{доп.макс}$ — амплитуда рабочего напряжения, допустимая для данного вида конденсатора, *в*.

Для электровакуумных приборов

$$k_н = \frac{P_{нак} + P_а + \Sigma P_с}{P_{нак.ном} + P_{а.доп}}, \qquad (8)$$

где $P_{нак}$ — мощность, затрачиваемая в цепи накала, *вт*; $P_{нак.ном}$ — номинальная мощность цепи накала, *вт*; $P_а$ — мощность, рассеиваемая в анодной цепи, *вт*; $P_{а.доп}$ — мощность, рассеиваемая в анодной цепи, допустимая для данной лампы (указывается в справочниках); *вт*; $\Sigma P_с$ — суммарная мощность, рассеиваемая в сеточных цепях, *вт*.

Для полупроводниковых диодов

$$k_н = \frac{I_в}{I_{в.доп}}, \qquad (9)$$

где $I_в$ — действующее значение выпрямленного тока диода, *а*;
$I_{в.доп}$ — допустимое действующее значение тока диода, *а*.

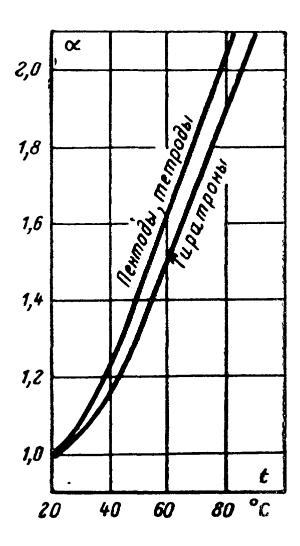


Рис. 2. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов от температуры окружающей среды для тетродов, пентодов и тиратронов при номинальной электрической нагрузке.

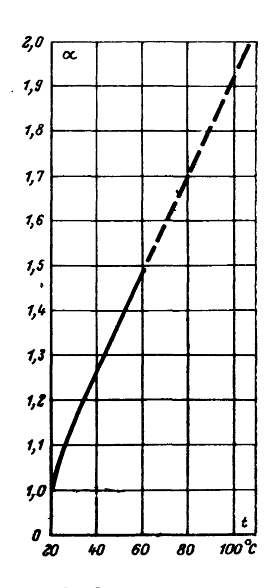


Рис. 3. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов от температуры окружающей среды для электроннолучевых трубок при номинальной электрической нагрузке.

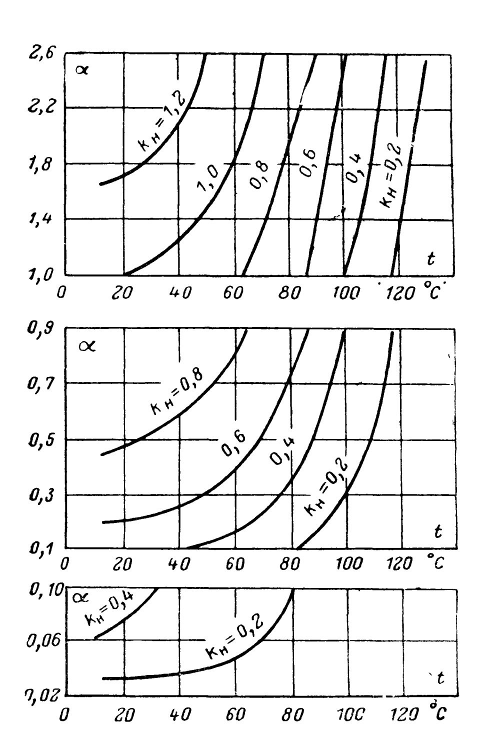


Рис. 4. Зависимость коэффициента интенсивности отказов для керамических конденсаторов (КДК, КТК и т. п.) от температуры окружающей среды и величины электрической нагрузки.

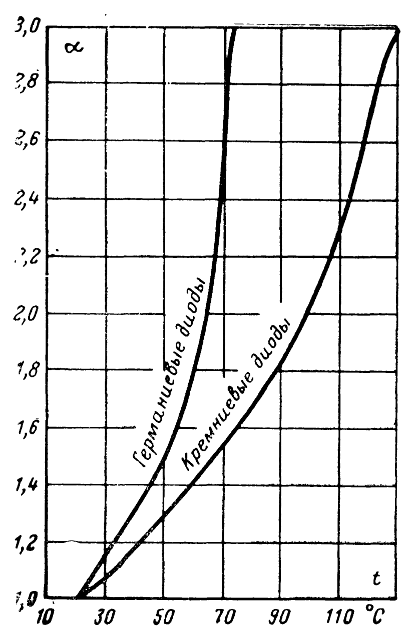


Рис. 5. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов от температуры окружающей среды для полупроводниковых диодов при номинальной электрической нагрузке.

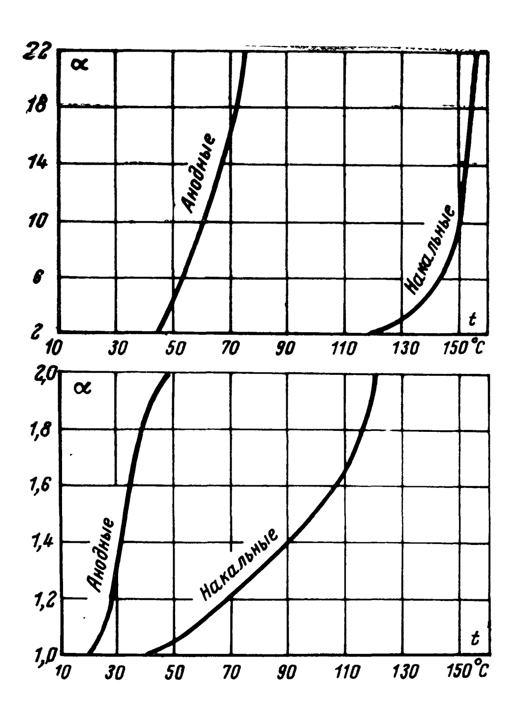


Рис. 6. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов от температуры окружающей среды для анодных и накальных трансформаторов.

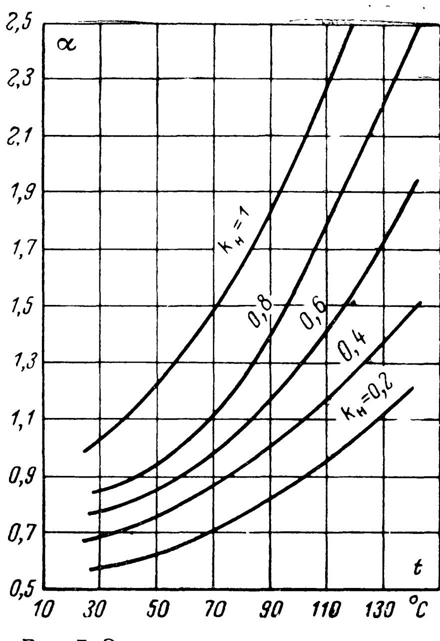


Рис. 7. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов для электровакуумных диодов и триодов от температуры окружающей среды и величины электрической нагрузки.

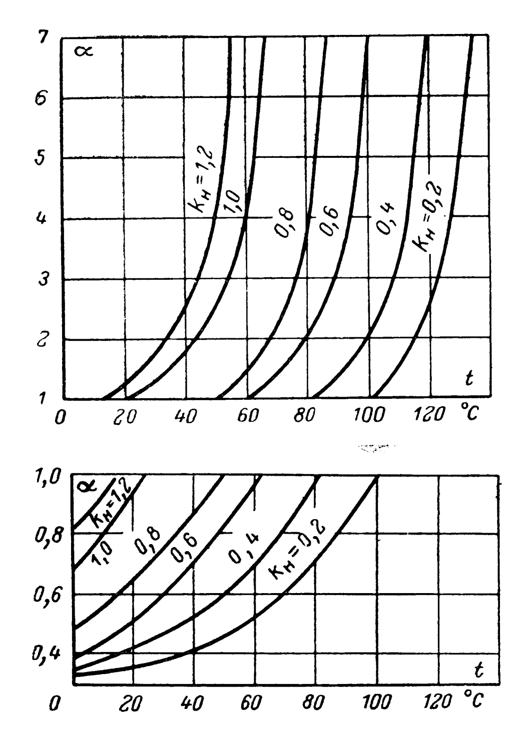


Рис. 8. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов для пленочных резисторов (типа МЛТ) от температуры окружающей среды и величины электрической нагрузки.

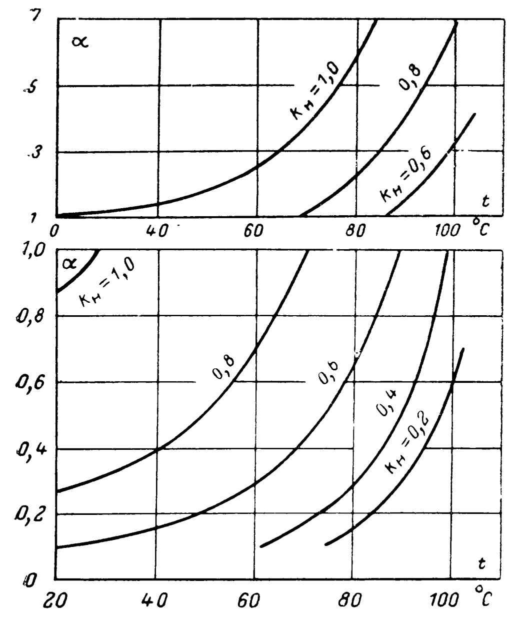


Рис. 9. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов для слюдяных конденсаторов (типа КСО) от температуры окружающей среды и величины электрической нагрузки.

Для полупроводниковых триодов

$$k_{\text{н}} = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{к.доп}}}, \tag{10}$$

где $P_{\text{к}}$ — мощность, рассеиваемая на коллекторе, *вт*;
$P_{\text{к.доп}}$ — допустимая мощность рассеивания на коллекторе (оговаривается в справочниках), *вт*.

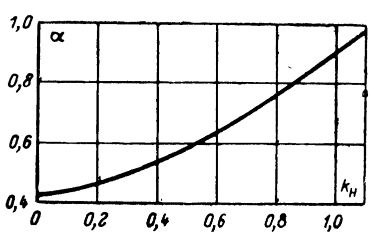


Рис. 11. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов катушек индуктивности, трансформаторов, сельсинов и электродвигателей от величины электрической нагрузки.

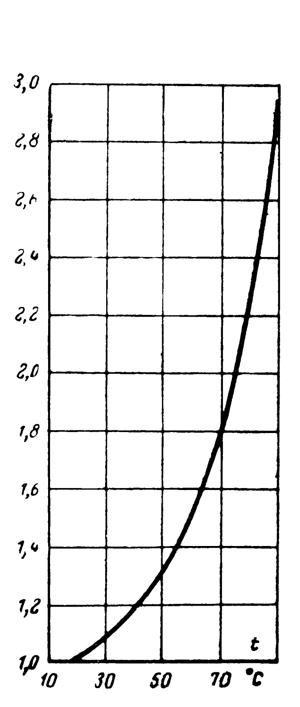


Рис. 10. Зависимость коэффициента интенсивности отказов от температуры окружающей среды для проволочных резисторов при номинальной электрической нагрузке.

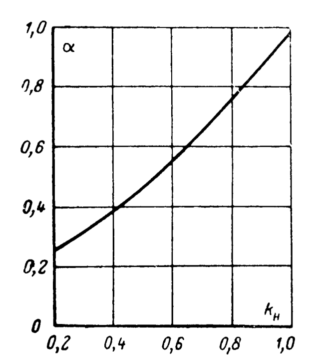


Рис. 12. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов реле от величины электрической нагрузки контактов.

Для примера рассмотрим надежность германиевого транзистора типа П214В, который работает в схеме усилителя напряжения при температуре окружающей среды +40° С. Мощность, рассеиваемая коллектором, равна 1,8 *вт* при напряжении 9 *в*.

Согласно паспортным данным допустимая мощность, рассеиваемая коллекторной цепью, для данного триода составляет 10 *вт*. Отсюда коэффициент нагрузки по мощности будет равен:

$$k_{\text{н}} = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{к.доп}}} = \frac{1,8}{10} = 0,18.$$

Из приложения находим интенсивность отказов для германиевых транзисторов $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6}$ 1/*ч*.

По рис. 14 находим значение коэффициента $\alpha = 0,4$.

В этих условиях интенсивность отказов транзистора составит:

$$\lambda_{\text{тр}} = \lambda\alpha = 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 = 0,24 \cdot 10^{-6} \ 1/ч.$$

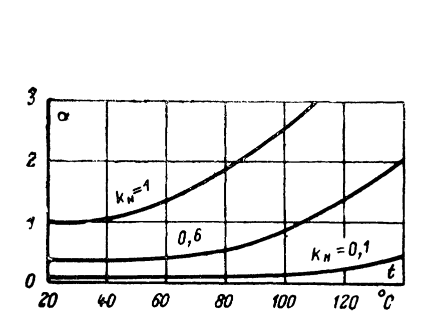


Рис. 13. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов для низкочастотных кремниевых триодов от температуры окружающей среды и величины электрической нагрузки.

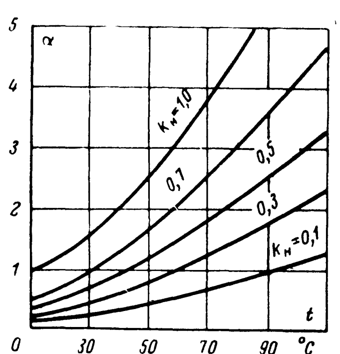


Рис. 14. Зависимость эксплуатационного коэффициента интенсивности отказов для германиевых триодов от температуры окружающей среды и величины электрической нагрузки.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ БЛОКА

При расчете надежности аппаратуры (отдельного блока) мы будем рассматривать наиболее простой и распространенный случай, когда все элементы схемы соединены с точки зрения надежности последовательно, т. е. отказ одного элемента приводит к отказу всей системы (блока). Кроме того, можно предположить, что элементы являются независимыми — отказ в работе одного элемента не снижает надежности других. При расчете надежности аппаратуры и ее составных частей учитываются только те отказы, которые носят случайный характер, т. е. такие, которые нельзя предусмотреть и которые не вызваны отказами других элементов, входящих в аппаратуру. Этот метод оправдывается тем, что неслучайные отказы могут быть своевременно предупреждены, а вторичные отказы, происходящие иногда сразу после случайных, не повлияют на надежность аппаратуры с последовательным соединением элементов, потому что работоспособность такой аппаратуры будет нарушена отказом того элемента, который вышел из строя первым.

Примером вторичного отказа может быть перегорание сопротивления резистора в катодной цепи лампы после пробоя между анодом и катодом.

Для большинства элементов аппаратуры вероятность безотказной работы может быть подсчитана по формуле

$$p_i(t) = e^{-\lambda t}. \tag{11}$$

При последовательном соединении элементов в структурной схеме надежности аппаратура будет работать безотказно, если не произойдет отказ первого элемента структурной схемы, второго, третьего и т. д. Для нахождения вероятности безотказной работы всей последовательной схемы необходимо, очевидно, перемножить вероятности безотказной работы всех ее элементов, т. е.

$$P(t) = p_1(t)\, p_2(t) \ldots p_n(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} \ldots e^{-\lambda_n t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda t}, \tag{12}$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы аппаратуры; $p_1(t)$, ..., $p_n(t)$ — вероятности безотказной работы последовательно включенных в структурную схему элементов; $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n$ — интенсивность отказов аппаратуры, равная сумме интенсивностей отказов последовательно соединенных в структурной схеме элементов.

Нужные для расчета интенсивности отказов значения λ определяют в зависимости от имеющихся данных и требуемой точности таким же образом, как и для отдельного элемента.

Расчет ожидаемой надежности аппаратуры (нерезервированных блоков), предназначенной для работы в течение заданного времени с момента включения, ведется по следующей методике.

1. Анализируется принципиальная схема с точки зрения надежности:

а) составляется структурная схема блока (с точки зрения надежности). В структурную схему включаются все элементы принципиальной схемы, отказ которых приводит к отказу аппаратуры;

б) составляется таблица режимов работы элементов схемы и из приложения и рис. 2-14 определяются значения λ-характеристик всех элементов.

Таблица 2

Наименование и тип элемента	Режим работы		Коэффициент нагрузки $k_н$	Окружающая температура t, °C	λ-характеристика $\times 10^{-6}$, 1/ч		Примечание
	фактический	допустимый			номинальное значение	с учетом условий эксплуатации	

Результаты заносятся в табл. 2. В графу (2) и (3) вносятся основные параметры, определяющие режим работы элементов, на-

пример, для резисторов и полупроводниковых триодов — мощность рассеивания, для конденсаторов — рабочее напряжение и т. д.

2. Определяется ожидаемая интенсивность отказов аппаратуры или среднее время безотказной работы. Суммарная интенсивность отказов аппаратуры λ с учетом условий эксплуатации определяется на основании данных табл. 2 по формуле (12). Если известно T_0 для элементов, то с помощью формулы (2) переходят к интенсивности отказов λ.

3. По формуле (12) рассчитывается ожидаемая вероятность безотказной работы аппаратуры в течение заданного времени после включения.

Сказанное справедливо для нерезервированной аппаратуры с учетом того, что к моменту включения аппаратура была исправна.

В том случае, если по условиям эксплуатации допускается мелкий текущий ремонт аппаратуры, надежность ее будет определяться не только способностью безотказно работать, но и тем, как быстро могут быть устранены отказы. Это свойство называется ремонтопригодностью аппаратуры. Ремонтопригодность аппаратуры обеспечивается наличием контрольных гнезд в узловых точках принципиальной схемы для включения измерительных приборов, наличием запасных блоков и субблоков, наличием ЗИП, расположением монтажа, обеспечивающим доступ для ремонта любой части схемы, удобством конструкции и другими мерами, направленными на облегчение и ускорение поиска места неисправности и ее устранения.

Поскольку такая аппаратура в течение некоторого времени эксплуатации будет находиться в состоянии ремонта, количественный критерий ее надежности должен учитывать, какой процент от времени эксплуатации аппаратура находится в исправном состоянии. Для оценки этого отношения служит коэффициент готовности.

$$K_г = \frac{T_0}{T_0 + T_в}, \qquad (13)$$

где $T_в$ — среднее время ремонта аппаратуры, *ч*; $K_г$ — есть вероятность того, что в любой момент времени аппаратура исправна.

Количественный критерий надежности ремонтируемой аппаратуры определяется произведением вероятности исправного состояния в любой момент времени на вероятность безотказной работы в течение заданного времени, т. е.

$$R(t) = K_г P(t) = \frac{T_0}{T_0 + T_в} e^{-\lambda t_{зад}}. \qquad (14)$$

Соотношение (14) определяет вероятность того, что аппаратура проработает безотказно в течение заданного интервала времени, начиная с любого момента времени.

Все ранее сказанное относится к блокам (системам), не имеющим резерва. В связи с тем что требования по надежности к аппаратуре все время возрастают, а ряд элементов, применяемых в аппаратуре, имеет относительно большую интенсивность отказов, возникает необходимость введения резервирования аппаратуры.

Резервирование может быть общим (резервируется группа элементов, блоки или аппаратура в целом) или поэлементным (резервируется каждый элемент в отдельности).

Отношение числа резервных элементов, блоков или систем к числу резервируемых называется **кратностью резервирования** и обозначается m.

Введем основные соотношения, необходимые для расчета надежности аппаратуры, в которой применяется резервирование.

Случай общего резервирования. Рассмотрим систему, которая состоит из четырех элементов, резервируемую с кратностью, равной двум, $m=2$ (рис. 15). На одну основную систему здесь приходятся две резервных.

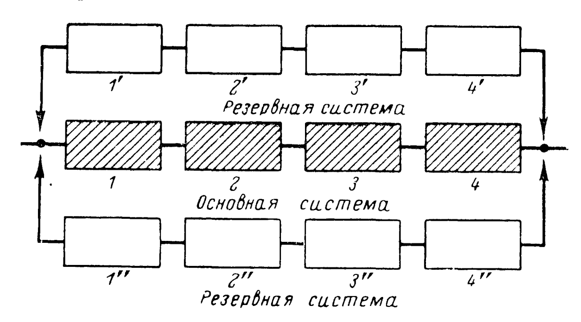


Рис. 15. Схема общего резервирования.

Элементы основной системы *1*, *2*, *3* и *4* обладают вероятностью безотказной работы в течение времени t соответственно $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$ и $p_4(t)$. Такую же надежность имеют элементы обеих резервных систем.

Вероятность безотказной работы основной системы (аналогично резервным) будет:

$$P_0(t) = p_1(t)\, p_2(t)\, p_3(t)\, p_4(t).$$

Вероятность отказа основной системы $Q(t)$ находится как вероятность противоположного события, т. е.

$$Q(t) = 1 - P_0(t) = 1 - p_1(t)\, p_2(t)\, p_3(t)\, p_4(t). \qquad (15)$$

Все устройство откажет, если окажутся неисправными все три системы. Поскольку отказы этих систем являются независимыми событиями, для определения вероятности отказа устройства получим:

$$Q_c = Q_1 Q_2 Q_3 = [1 - p_1(t)\, p_2(t)\, p_3(t)]^3, \qquad (16a)$$

а для вероятности безотказной работы

$$P_c(t) = 1 - [1 - p_1(t) p_2(t) p_3(t) p_4(t)]^3. \qquad (16)$$

В общем случае, когда система состоит из n элементов и кратность резервирования равна m формула (16) примет вид:

$$P_c(t) = 1 - [1 - p_1(t) p_2(t) \ \dots \ p_n(t)]^{m+1}.$$

Если все элементы равнонадежны, то

$$P_c(t) = 1 - [1 - p_i(t)^n]^{m+1}. \qquad (17)$$

Здесь p_i — вероятность безотказной работы i-го элемента в течение времени t;

n — число элементов любой из $m+1$ систем.

Следует заметить, что под элементами при резервировании понимают цепи, блоки или приборы, входящие в состав резервируемой системы.

Пример расчета. Имеется аппаратура, которая состоит из двух равнонадежных последовательно включенных блоков, каждый из которых обладает вероятностью безотказной работы, равной 0,9. Аппаратура резервирована двумя аналогами. Требуется определить время безотказной работы данной системы.

В данном случае $n=2$, $m=2$. Следовательно, на основании формулы (17)

$$P_c(t)=1[1-0{,}9^2]^{2+1}=0{,}99316.$$

Случай поэлементного резервирования. Имеется система, состоящая из четырех последовательно соединенных групп элементов. В каждой группе имеется один основной и два резервных элемента (рис. 16).

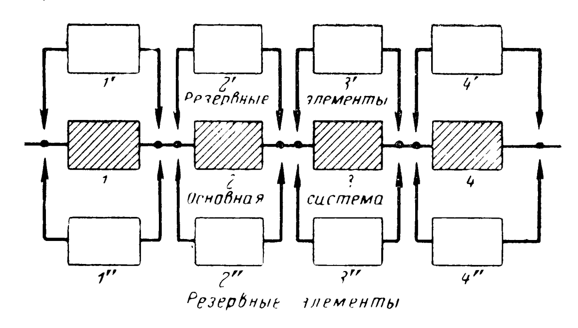


Рис. 16. Схема поэлементного резервирования.

Вероятность безотказной работы каждого из элементов первой группы как основного, так и резервных обозначим через $p_1(t)$, второй, третьей и четвертой — через $p_2(t)$, $p_3(t)$ и $p_4(t)$ соответственно.

Первая группа элементов выйдет из строя и система откажет в том случае, если откажут все входящие в нее элементы. Вероятность этого события, т. е. вероятность отказа первой группы, найдем по формуле (16а):

$$Q_1=[1-p_1(t)]^3.$$

Аналогично находим вероятность отказа и для остальных групп:

$$Q_2(t)=[1-p_2(t)]^3;$$
$$Q_3(t)=[1-p_3(t)]^3;$$
$$Q_4(t)=[1-p_4(t)]^3.$$

Вероятности безотказной работы групп определятся как события противоположные:

$$P_1(t)=1-[1-p_1(t)]^3;$$
$$P_2(t)=1-[1-p_2(t)]^3;$$
$$P_3(t)=1-[1-p_3(t)]^3;$$
$$P_4(t)=1-[1-p_4(t)]^3.$$

Вероятность безотказной работы системы найдем как произведение вероятности безотказной работы всех групп элементов

$$P_c(t)=\{1-[1-p_1(t)]^3\}\{1-[1-p_2(t)]^3\}\{1-[1-p_3(t)]^3\}\times$$
$$\times\{1-[1-p_4(t)]^3\}.$$

В случае, когда число элементов в системе равно n, кратность резервирования m и все элементы равнонадежны, формула имеет вид:

$$P_c(t)=\{1-[1-p_i(t)]^{m+1}\}^n, \qquad (18)$$

где $p_i(t)$ — вероятность безотказной работы элемента за время t.

Допустим, что, как и в предыдущем примере, имеется аппаратура, состоящая из двух последовательно соединенных равнонадежных блоков ($n=2$), каждый из которых имеет вероятность безотказной работы 0,9.

Каждый основной блок резервирован двумя аналогичными блоками ($m=2$). Требуется найти вероятность безотказной работы системы.

По формуле (18) получим:

$$P_c(t)=[1-(1-0,9)^{2+1}]^2=(1-0,1^3)^2=0,9979.$$

Из примеров видно, что поэлементное резервирование обеспечивает более высокую надежность систем.

На практике чаще всего применяется поэлементное резервирование отдельных схем, блоков и субблоков; отдельные комплектующие элементы, как правило, не резервируются. Причиной этого являются трудности осуществления переключающей схемы, связанные с возникновением обратных связей при усложнении монтажа, увеличением его емкости, потерей помехоустойчивости из-за возникающих при этом наводок и т. п.

Общее резервирование систем также применяется редко, в особо важных случаях, так как требует создания минимум двух образцов вместо одного. Это дорого и в большинстве случаев не оправдано.

Способ переключения резервируемых схем, блоков и субблоков зависит от режима резервирования. Различают три режима резервирования: горячее, холодное и резервирование в дежурном режиме.

При горячем резервировании резервный блок находится под напряжением и в любой момент готов принять на себя выполнение рабочих функций при включении его входа и выхода в канал прохождения сигнала. В этом режиме ресурс резервного блока расходуется так же, как и у основного. (Горячим резервом называется аппаратура, обладающая такими же характеристиками, что и основная, подключаемая параллельно и работающая одновременно с нею.)

Холодным резервом называется аппаратура, обладающая теми же характеристиками, что и основная, исправная и готовая к включению в любой момент времени, но не работающая одновременно с основной. При холодном резервировании резервный блок полностью отключен от источников питания. Ресурс резервного блока при этом не расходуется до тех пор, пока блок не будет включен.

Дежурный режим предусматривает подачу на резервный блок тех напряжений питания, которые связаны с временем установления

рабочего состояния (например, подачу напряжения накала в ламповых схемах). При этом ресурс резервного блока расходуется лишь частично.

Выбор режима зависит от того, как велико может быть время переключения, т. е. перерыв в работе аппаратуры. Если это время должно быть минимальным, применяется горячее резервирование или резервирование в ждущем режиме. Если допускается небольшой перерыв, соизмеримый с временем прогрева при включении резервного блока, применяется холодное резервирование.

Переключение резервных блоков может осуществляться вручную или автоматически с помощью специальных схем. При этом необходимо, чтобы переключающие устройства были по крайней мере на порядок надежнее переключаемых блоков.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ

Как известно, радиоаппаратура отказывает из-за неудовлетворительной надежности элементов, ошибок при конструировании и изготовлении, а также в результате неправильной эксплуатации. Даже хорошо изготовленные и сконструированные элементы (имеющие малую интенсивность отказов) могут стать причиной всевозможных неисправностей, если их применять в режимах и условиях эксплуатации, на которые они не рассчитаны. Это говорит о том, что ни в коем случае не следует превышать оговоренные в справочной литературе допустимые значения токов, напряжений, рассеиваемой мощности и других эксплуатационных параметров для выбранного элемента.

Электровакуумные приборы в электронной аппаратуре являются одними из самых ненадежных элементов массового применения. Поэтому умение ставить лампы в наиболее благоприятный режим эксплуатации позволяет в значительной мере продлить срок их службы.

1. Верхний и нижний пределы напряжения накала. Этот параметр наиболее существенно влияет на надежность и долговечность ламп, так как определяет температуру оксидного катода, которая играет решающую роль в изнашивании ламп. Для каждой лампы существует определенная зависимость между температурой катода и напряжением накала. Такая зависимость для лампы 6Ж1Б показана на рис. 17.

Приближенная зависимость интенсивности отказов от напряжения накала имеет вид:

$$\lambda_1 \approx 0,4\lambda + 0,6\lambda \left(\frac{u_{\text{н.раб}}}{u_{\text{н.доп}}}\right)^{12}, \qquad (19)$$

где λ — интенсивность отказов ламп при их эксплуатации с номинальным напряжением накала $u_{\text{н.доп}}$; λ_1 — интенсивность отказов ламп при эксплуатации с напряжением накала $u_{\text{н.раб}}$, отличным от номинального.

Данная формула дает достаточную для практических целей точность в том случае, если напряжение накала отличается при эксплуатации от номинального не более чем на 5—10% в сторону понижения и не более чем на 10—15% в сторону повышения. Повышение напряжения накала увеличивает вероятность перегорания

и обрывов подогревателей, нарушения сварных соединений и геометрии катода и приводит к ухудшению изоляции между катодом и подогревателем.

Понижение напряжения накала на незначительную величину (3—5%) может способствовать в ряде случаев снижению интенсивности перегорания подогревателей катодов ламп. Однако при этом ухудшаются условия токоотбора и падает ресурс катода. Таким образом, напряжение накала целесообразно стабилизировать.

Особенно опасно понижение накала ламп в импульсном режиме при отборе с катода больших токов, например в блокинг-генераторах.

2. Наибольшее сопротивление в цепи сетки не должно превышать допустимого значения для данного типа лампы. Нарушение этого условия может привести к резкому возрастанию анодного тока и рассеиваемой на аноде мощности, так как при включении в сеточную цепь усилительной лампы резистора значительного сопротивления протекание обратного тока сетки вызывает падение напряжения на этом сопротивлении, в результате чего уменьшается отрицательное смещение на управляющей сетке, что влечет за собой дальнейшее увеличение анодного тока. Последний увеличивает ионизацию остаточного газа, при этом обратный ток сетки еще более увеличивается и т. д. С увеличением анодного тока увеличивается мощность, рассеиваемая на аноде, происходит интенсивное газовыделение. Процесс нарастания токов происходит лавинообразно и лампа выходит из строя (отказывает).

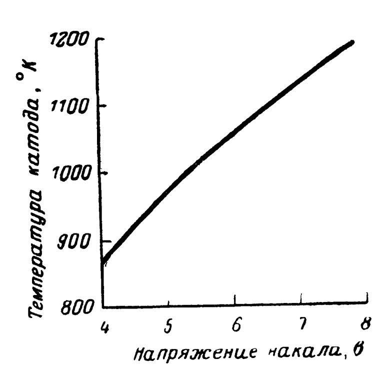


Рис. 17. Зависимость температуры катода лампы 6Ж1Б от напряжения накала.

3. Превышение допустимых напряжений на аноде и экранной сетке нередко приводит к пробою изоляции электродов, разрушению оксидного катода и другим опасным явлениям, так как вызывает увеличение мощности, рассеиваемой этими электродами.

4. Превышение допустимых мощностей, рассеиваемых анодом и экранирующей сеткой, приводит к усиленному газовыделению и ускоренному отравлению катода. Помимо этого происходит значительное ухудшение вакуума. Для уменьшения мощности, рассеиваемой на электродах лампы, и тем самым повышения срока ее службы целесообразно питать анодно-экранную цепь мощных генераторных ламп (6П13С, 6П31С и др.) через делитель напряжения.

5. Превышение наибольшей допустимой амплитуды обратного напряжения для кенотронов приводит к резкому ухудшению вакуума и пробою между электродами.

6. Превышение напряжения между катодом и подогревателем (для ламп с подогревным катодом) приводит к ухудшению изоляции катод — подогреватель, увеличению токов утечки и в конечном итоге к пробою и короткому замыканию подогревателя и катода.

7. Превышение допустимой температуры баллона лампы весьма отрицательно действует на надежность последней, так как нагретое стекло является интенсивным источником различных газов. При значительных температурах происходит размягчение и электролиз стекла баллона.

Как правило, для надежной работы радиоаппаратуры температура баллонов ламп не должна превышать +170° С или допустимых значений, предусмотренных справочными документами на данный тип лампы. В табл. 3 приведены допустимые температуры баллонов некоторых приемо-усилительных ламп.

Таблица 3

Наименование лампы	Температура баллона $T_б$, °С
6Ж1П	140
6Ж2П	140
6Ж5П	180
6К4П	120
6Н1П	180
6Н2П	140
6Н3П	150
6П1П	250
6П14П	200
6П15П	180
6П18П	200
6Х2П	80

Для иллюстрации влияния температуры на надежность ламп на рис. 18 приведен график изменения вероятности безотказной работы лампы при различной температуре стеклянного баллона.

Ресурс ламп можно увеличить, если сохранять температуру стеклянных баллонов на низком уровне. Это особенно важно для мощных усилительных и генераторных ламп, аноды и катоды которых рассеивают значительную мощность. Конечная температура лампы зависит не только от рассеяния мощности внутри самой лампы, но и от температуры окружающей среды в значительной близости от нее. Поэтому желательно располагать горячие лампы на значительном расстоянии друг от друга. По возможности лампы, излучающие большое количество тепла, нужно располагать горизонтально на вертикальном шасси. Применение экранов ухудшает условия отвода тепла от лампы и сказывается на их надежности. Поэтому там, где это не вызывается безусловной необходимостью, экраны применять не следует. Одним из эффективных методов снижения температуры является отвод тепла от баллона лампы радиаторами с большим лучеиспусканием и теплопроводностью. Конструкция одного из простейших радиаторов приведена на рис. 19. Радиатор представляет металлический разрезной цилиндр, плотно облегающий баллон лампы. (Радиатор покрывают теплостойкой краской с большим коэффициентом лучеиспускания.) К разрезному цилиндру приварен внешний разрезной радиатор в виде квадрата или многоугольника. Подобный радиатор можно применить для облегчения температурного режима ламп 6П13С, 6П31С генератора строчной развертки телевизора и 6П3С, 6П14П, работающих в мощных усилительных каскадах и генераторах.

Полупроводниковые приборы. Высокая надежность полупроводниковых приборов обеспечивается строгим соблюдением условий их применения. Важнейшим из этих условий является температура окружающей среды. Влияние высокой температуры на кристаллические диоды и триоды приводит к необходимости охлаждения их для получения максимальной мощности рассеяния. Температура корпуса германиевых полупроводниковых приборов не должна пре-

вышать +80° С, а кремниевых +130° С в наихудших условиях эксплуатации.

При максимальной мощности рассеяния, предусмотренной для каждого полупроводникового прибора, и высокой температуре окружающей среды возрастает температура переходов.

Под максимальной температурой перехода понимают такую температуру, при которой полупроводниковый прибор либо перестает выполнять свои функции, либо окончательно выходит из строя, т. е. с точки зрения надежности в обоих случаях происходит отказ. В первом случае температура определяется состоянием, в котором

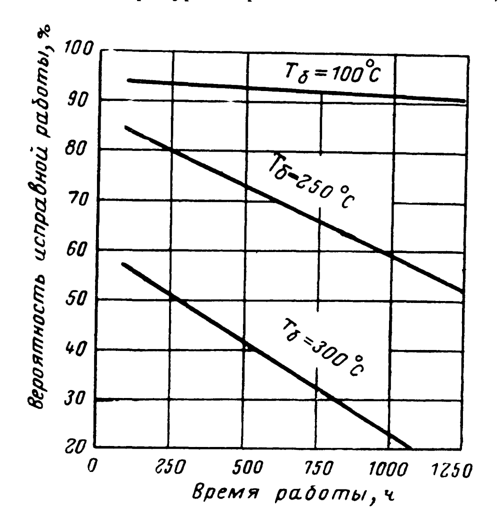


Рис. 18. Вероятность исправной работы ламп в зависимости от температуры стеклянного баллона.

полупроводниковый прибор приобретает собственную проводимость, и переходы перестают существовать. В данном случае процесс обратим — при остывании прибор приобретает вновь все свои свойства. Во втором случае максимальная температура определяется потерей термоустойчивости полупроводникового прибора, т. е. состоянием, когда прибор переходит в неустойчивый режим кумулятивного разогрева. Повышение температуры в этом случае приводит к необратимым изменениям в решетке монокристалла, наступает пробой и полупроводниковый прибор выходит из строя окончательно.

Основные допустимые эксплуатационные данные полупроводниковых диодов — наибольший выпрямленный ток и амплитуда обратного напряжения — существенно зависят от температуры окружающей среды, поэтому в справочниках приводятся данные для различных температур.

Значения амплитуды обратного напряжения и величины выпрямленного тока при различной температуре окружающей среды

Таблица 4

Наименование диода	Температура окружающей среды t, °С					
	20		50		70	
	Обратное напряжение, *в*	Ток, *а*	Обратное напряжение, *в*	Ток, *а*	Обратное напряжение, *в*	Ток, *а*
Д7Б	100	0,3	80	0,3	50	0,2
Д7Г	200	0,3	150	0,3	100	0,2
Д7Е	350	0,3	225	0,3	140	0,2
Д7Д	300	0,3	200	0,3	130	0,2
Д7Ж	400	0,3	250	0,3	150	0,2
Д302	200	1,0	200	1,0	200	0,8
Д303	150	3,0	150	2,5	150	1,5
Д304	100	5,0	100	3,5	100	1,8
Д305	50	10,0	50	6,5	50	3,0
ДГ-Ц24	200	0,3	125	0,3	65	0,1
ДГ-Ц26	350	0,1	240	0,1	110	0,05
ДГ-Ц27	400	0,1	270	0,1	130	0,05

для некоторых типов германиевых диодов приведены в табл. 4, а для кремниевых диодов в табл. 5.

Во всех случаях амплитуда обратного напряжения для полупроводниковых диодов не должна превышать 80% от наибольшего значения, которое приводится в справочнике для данной температуры окружающей среды. Полупроводниковые диоды имеют большой разброс параметров по прямому и обратному сопротивлениям,

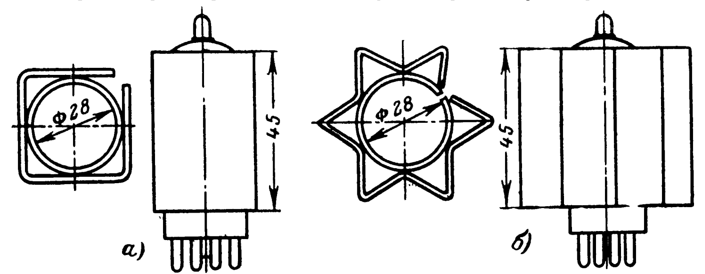


Рис. 19. Простейшие радиаторы для лампы 6П13С.
а — четырехугольный; *б* — многоугольный.

поэтому для обеспечения приблизительно одинаковых условий работы последовательно и параллельно включенных диодов их подбирают по одинаковым значениям указанных параметров, что наиболее целесообразно в любительских условиях.

Применение шунтирующих и добавочных сопротивлений вызывает дополнительный расход мощности.

Для полупроводниковых триодов значение наибольшей мощности $P_{макс}$, рассеиваемой коллектором, также в значительной мере зависит от окружающей температуры.

Таблица 5

Наименование диода	Температура окружающей среды t, °C			
	20		120	
	Обратное напряжение, *в*	Ток, *а*	Обратное напряжение, *в*	Ток, *а*
Д226	400	0,3	300	0,2
Д229	200	0,4	200	0,2
Д231	300	10,0	300	5,0
Д237А	200	0,3	200	0,1
Д242	100	10,0	100	5,0

Обычно в справочниках указывается, на сколько снижается эта мощность при повышении температуры на каждые 10° С.

Наибольшая рассеиваемая мощность при повышенной окружающей температуре для некоторых полупроводниковых триодов может быть вычислена по формулам:

а) для транзисторов МП9А, МП10, МП11, МП13, МП14, МП15, МП16, МП39, МП40, МП41, МП42 при температуре окружающей среды (t° С) выше 45—50° С

$$P_{\text{макс}} = \frac{85°\text{C} - t°\text{C}}{0,2}, \ \textit{мвт};$$

б) для транзисторов МП25 и МП26 при температуре окружающей среды (t° С) свыше 35° С

$$P_{\text{макс}} = \frac{75°\text{C} - t°\text{C}}{0,2}, \ \textit{мвт};$$

в) для транзисторов П4 при температуре корпуса ($\overset{\circ}{t}$ К) свыше 40° С

$$P_{\text{макс}} = \frac{90 - t°_{\text{к}}}{2}, \ \textit{вт};$$

г) для транзисторов П201, П202, П203 при температуре корпуса ($\overset{\circ}{t}_{\text{к}}$) свыше 50° С

$$P_{\text{макс}} = \frac{85°\text{C} - t°_{\text{к}}}{3,5}, \ \textit{вт};$$

д) для транзисторов П213, П214, П215 при температуре теплоотвода ($\overset{\circ}{t}_{\text{т}}$) свыше 45° С

$$P_{\text{макс}} = \frac{85°\text{C} - t°_{\text{т}}}{3,5}, \ \textit{вт};$$

е) для транзисторов П401, П402, П403 при температуре окружающей среды (t° С) свыше 20° С

$$P_{\text{макс}} = 100 - 1,5(t°\,\text{C} - 20°), \ \textit{мвт};$$

ж) для транзисторов П420, П421, П422, П423 при температуре от 20 до 55° С наибольшая рассеиваемая мощность снижается на 5 *мвт* на каждые 10° С.

Таблица 6

Транзисторы	П302	П601	П601	П201	П4	П4	П209	П214
Рассеиваемая мощность, *вт*	5	1	3	4	1	2	5	10
Площадь радиатора, *см*^{2}	81	15	100	16	25	81	120	150

Для повышения надежности полупроводниковых приборов нельзя располагать их вблизи нагревающихся элементов (ламп, трансформаторов, мощных резисторов и т. п.). Недопустимо для триодов при наличии напряжений на электродах допускать отключения цепи базы в схемах с общим эмиттером и цепи эмиттера в схемах с общей базой.

Для повышения надежности полупроводниковых приборов, используемых при повышенных мощностях, необходимо производить интенсивный отбор тепла от корпуса прибора. В большинстве случаев для этой цели используются радиаторы самых разнообразных конструкций. Простейшие из них представляют собой металлические пластины с размерами, достаточными для хорошего отбора тепла от корпуса полупроводникового прибора. В табл. 6 и 7 приведены

Таблица 7

Диоды	Д303		Д304		Д305		Д242			
Температура среды *t*, °С	25	70	25	70	25	70	25		125	
Наибольший выпрямленный ток, *а*	3	1,5	5	1,5	10	3	5	10	5	10
Площадь радиатора, *см*^{2}	30		50		180		25	50	100	200

основные размеры охлаждающей поверхности радиаторов, выполненных в виде пластин (толщина пластины радиатора должна быть не менее 3 *мм*). Приведенные сведения (в табл. 6) справедливы для температуры окружающей среды не выше +60° С.

В ряде конструкций для охлаждения мощных полупроводниковых диодов (например, Д215) можно использовать радиаторы от металлокерамических ламп типа ГИ-12Б и ГИ-30, которые показаны на рис. 20. Простые радиаторы для мощных транзисторов показаны на рис. 21.

Для лучшего теплоотвода рабочую поверхность радиатора в месте закрепления транзистора желательно отшлифовать таким образом, чтобы обеспечить наилучший механический контакт по всей плоскости соприкосновения полупроводникового прибора с поверхностью радиатора. Отверстия для выводов транзистора следует

сделать небольшими по размеру. Не следует сверлить одно отверстие под все выводы, так как это ухудшает теплоотдачу. При необходимости изолировать корпус полупроводникового прибора от шасси изоляционную прокладку следует устанавливать между радиатором и шасси, а не изолировать полупроводниковый прибор от радиатора. Транзисторы с мощностью рассеяния более 20 *вт* следует охлаждать принудительно с помощью вентилятора.

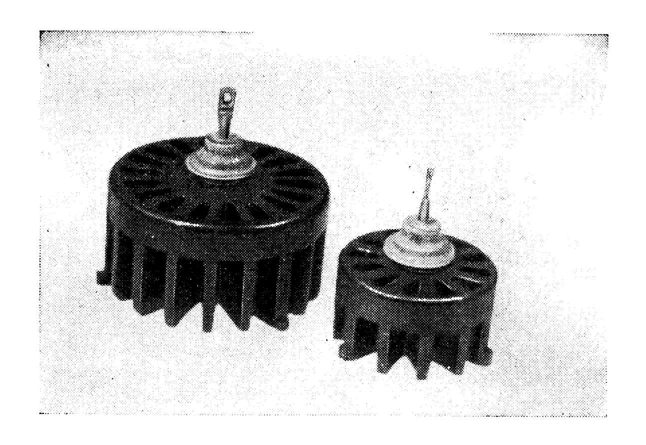


Рис. 20. Мощные полупроводниковые диоды Д215, установленные на радиаторах от ламп ГИ-12Б и ГИ-30.

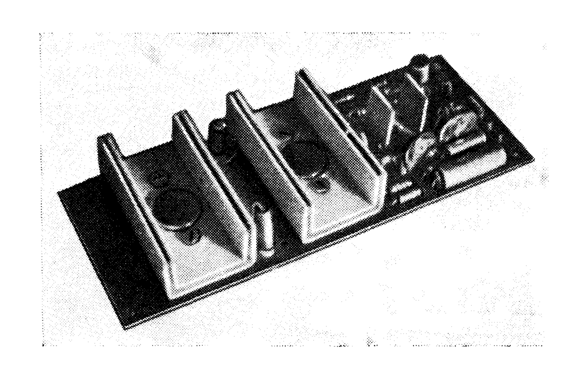
Важным условием обеспечения высокой надежности схем на полупроводниковых приборах является правильный выбор последних согласно целевым назначениям. При разработке конструкции следует использовать именно те полупроводниковые приборы, которые рассчитаны для данного класса устройств.

Все полупроводниковые приборы необходимо выбирать, исходя из мощности рассеяния. Для маломощных схем (с малыми коллекторными токами) необходимо применять маломощные транзисторы, применение мощного транзистора в данном случае весьма неэкономично. Не рекомендуется устанавливать мощные диоды с большим прямым током в маломощные выпрямители. Это неизбежно приведет к температурной нестабильности выпрямителя и росту пульсаций выпрямленного напряжения.

Резисторы. Значительный процент неисправностей радиоэлементов (исключая электровакуумные приборы) падает на резисторы. Снижение интенсивности отказов их даже на небольшую величину существенно влияет на повышение надежности радиоаппаратуры. Поэтому необходимо очень тщательно анализировать режим и условия, в которых они работают.

Рассмотрим условия применения некоторых типов резисторов. Постоянные углеродистые резисторы типа ВС выпускаются на номинальные рассеиваемые мощности от 0,25 до 10 *вт*. Они могут ра-

ботать в цепях постоянного, переменного синусоидального и импульсных напряжений при температуре окружающей среды от —60 до +100° С и относительной влажности воздуха —98%. Номинальные значения рассеиваемой мощности справедливы только в диапазоне температур от —40 до +40° С. При более высоких температурах предельные значения рассеиваемой мощности резко снижаются.



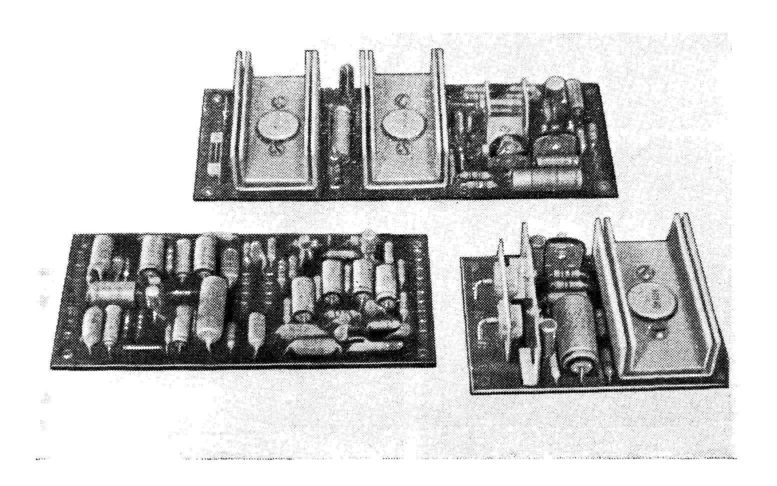


Рис. 21. Простые радиаторы для мощных транзисторов типа П201—П203.

Для определения допустимой нагрузки на резистор (в процентах от номинальной) в зависимости от температуры окружающей среды следует пользоваться графиком на рис. 22.

Средняя допустимая электрическая наргзука на резистор при действии импульсного напряжения снижается вдвое.

Таблица 8

Вид резисторов	Номинальная мощность, *вт*	Предельное рабочее напряжение, *в* (действ.)
ВС-0,25	0,25	350
ВС-0,5	0,5	500
ВС-1	1,0	700
ВС-2	2,0	1 000
ВС-5	5,0	1 500
ВС-10	10,0	3 000

При работе резисторов типа ВС в цепях постоянного или синусоидального тока предельные значения напряжений не должны превышать значений, указанных в табл. 8.

При работе резисторов в цепях импульсного тока при длительности импульсов не менее 0,1 *мксек* и частоте повторения не более 20 *кгц* амплитудные значения данных напряжений не должны превышать указанных в табл. 9 величин.

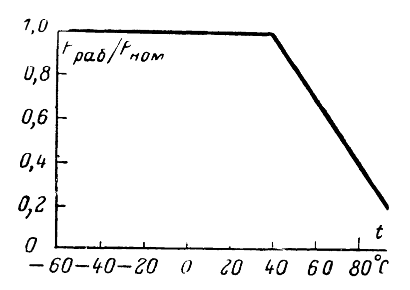


Рис. 22. Зависимость допустимой нагрузки резисторов типа ВС от температуры окружающей среды.

Разновидностью резисторов ВС являются резисторы типа УЛМ с номинальной мощностью рассеяния 0,12 *вт*, которые нашли широкое применение в малогабаритной аппаратуре на транзисторах.

Резисторы переменные (потенциометры) типа СП предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока. Эти резисторы по условиям применения делятся на три группы (III, IV, V). Резисторы III и IV групп предназначены для использования в жестких условиях эксплуатации (в интервале температур от —60 до +100÷125° С, при относительной влажности воздуха 98% при +40° С). Потенциометры V группы рассчитаны на менее тяжелые условия эксплуатации: интервалы температуры окружающей среды от —40 до +70° С, относительная влажность воздуха до 85% при +25° С. Номинальные значения рассеиваемых мощностей потенциометров типа СП будут предельными лишь при температуре окружающей среды не выше +20° С. При более высоких температурах определить номинальные значения рассеиваемых мощностей можно по графику рис. 23.

Наибольшее распространение в радиолюбительской практике получили резисторы МЛТ, поэтому на их эксплуатационных особенностях необходимо остановиться подробнее.

Конструктивно резисторы МЛТ выполнены на керамических металлизированных специальными сплавами основаниях с диаметром от 1,5 до 7,5 *мм*, которые с противоположных сторон армированы контактной арматурой — латунными никелированными наконечни-

Таблица 9

Вид резистора	Амплитудное значение импульсного напряжения, *в*
ВС-0,25	750
ВС-0,5	1 000
ВС-1	1 500
ВС-2	2 000
ВС-5	5 000
ВС-10	10 000

ками (колпачками) с медными посеребренными выводами диаметром от 0,5 до 1,0 *мм*.

От внешней среды резисторы защищены влагостойким лаком и механически прочной специальной эмалью. По способу изготовления резисторы могут быть со спиральной канавкой и без нее. Более надежными считаются безнарезные резисторы, имеющие несколько большую механическую прочность. Отсутствие спиральной канавки исключает электрический пробой между витками токопроводящей ленты (что имеет место у резисторов со спиральной канавкой).

Надежность резисторов существенно зависит от выбранного режима работы и условий внешней среды. Резисторы МЛТ могут использоваться при температурах от —60 до +125° С. При этом нужно учитывать, что при номинальной нагрузке резисторов предельная положительная температура не должна превышать +70° С. При более высоких температурах рассеиваемую мощность необхо-

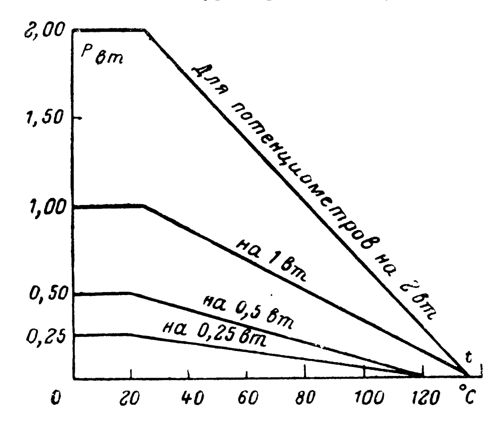


Рис. 23. Зависимость допустимой мощности, рассеиваемой потенциометрами типа СП, от температуры окружающей среды.

димо снижать. Например при температуре +120° С допустимая нагрузка по мощности может быть не более 30% от номинальной. При монтаже необходимо учитывать собственную температуру резисторов.

Температура перегрева, т. е. превышение собственной температуры над окружающей для резисторов МЛТ-0,125 составляет 30°, для МЛТ-0,25 — 55°, МЛТ-0,5 — 65°, МЛТ-1,0 — 75° и МЛТ-2—130°.

При работе резисторов МЛТ в различных устройствах наблюдаются необратимые изменения их активного сопротивления. Такие изменения при прочих разных условиях сказываются при экс-

плуатации в цепях постоянного тока сильнее, чем при эксплуатации в цепях переменного тока. Это объясняется тем, что под воздействием напряжения между витками проводящей ленты возникают электролитические процессы в керамическом основании резистора, что приводит к разрушению крайних зон витков токопроводящего слоя. При повышении температуры эти процессы значительно активизируются. При эксплуатации резисторов в точной аппаратуре необходимо учитывать изменение их сопротивления в течение длительного времени.

Исследования показывают, что большинство резисторов МЛТ со временем увеличивают сопротивление. Наибольшее изменение сопротивления наблюдается у резисторов свыше 510 *ком*. За несколько лет уход сопротивления может в среднем составить 1—2% у резисторов до 510 *ком* и 2—3% у резисторов свыше 510 *ком* в нормальных условиях эксплуатации.

К необратимым изменениям сопротивления резисторов МЛТ относится также изменение номинального значения под воздействием тепловой и электрической нагрузок. Эти изменения проявляются более интенсивно, чем при естественном старении. Значительное изменение первоначального сопротивления происходит при номиналах 100—300 *ком* и мало зависит от мощности. Средний коэффициент старения резисторов МЛТ за 1 000 часов на этих номиналах составляет примерно 1% (как правило, со знаком +). Правда, отдельные резисторы могут менять свое первоначальное сопротивление на 5—8%. Указанные данные относятся к номинальному режиму работы при температуре окружающей среды +70° С.

С уменьшением нагрузки и температуры окружающей среды изменение сопротивления резко падает и при нагрузках 0,2—0,5 от номинальной и комнатной температуры (+20° С) его можно не учитывать.

Пайка также может вызвать изменение первоначального сопротивления резисторов в среднем на 0,5% (со знаком +).

Кроме описанных выше необратимых изменений номинальных сопротивлений резисторов, обычно имеют место и обратимые явления, учитываемые температурным коэффициентом сопротивления и коэффициентом напряжения. Температура и напряжение, действуя на резисторы совместно, могут существенным образом изменить электрический режим работы всего устройства. В подавляющем большинстве случаев резисторы до 510 *ком* имеют положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС), а свыше 510 *ком* могут иметь и положительный и отрицательный ТКС. В среднем ТКС резисторов МЛТ составляет $\pm 0{,}2$—$0{,}5 \cdot 10^{-3}$.

Немаловажным обстоятельством в эксплуатации резисторов МЛТ является значение предельных рабочих напряжений.

Конструктор рассчитывает резистор по мощности, исходя из данных значений напряжения (или тока) и сопротивления. Однако резисторы МЛТ нельзя применять, руководствуясь только этими, на первый взгляд, правильными расчетами, так как для каждой мощности имеются предельные рабочие напряжения при нагрузке постоянным или переменным током, а именно для МЛТ-0,125—200 *в*, МЛТ-0,25—250 *в*, МЛТ-0,5—350 *в*, МЛТ-1—500 *в*, МЛТ-2—750 *в*. Использование резисторов при напряжениях, превышающих предельные, приводит к неизбежному пробою между витками токопроводящей ленты, так как канавка имеет ширину всего лишь 0,1—0,3 *мм*.

По величине собственных шумов резисторы делятся на две группы: группа «А» с уровнем ЭДС шумов до 1 *мкв* и группа «Б» с уровнем ЭДС шумов до 5 *мкв*. Эти данные проставлены на упаковочных коробках.

ЭДС шумов может отрицательно сказаться на работе различных усилительных устройств, особенно если резисторы стоят во входных цепях каскадов с большим усилением, так как величина полезного сигнала может быть соизмерима с ЭДС шумов резистора и на выходе устройства мы получим сигнал неудовлетворительного качества.

Приведенные выше значения ЭДС шумов относятся к 1 *в* приложенного напряжения. При напряжении большем, чем 1 *в*, пропорционально возрастают шумы. Поскольку ЭДС шумов имеет большой разброс, при наладке схемы необходимо подбирать резисторы с возможно меньшим уровнем шумов.

Резисторы МЛТ сохраняют свои номиналы до частот порядка 1 *Мгц*. На более высоких частотах эквивалентное сопротивление резисторов начинает резко падать.

Резисторы МЛТ весьма устойчивы к воздействию условий внешней среды и при правильной эксплуатации могут работать десятки тысяч часов.

В большинстве случаев изменение параметров резисторов и отказ их происходит в результате перегрева. Практически можно считать не выделяющими тепла резисторы сопротивлением более 1—2 *Мом*. Размещение резистора малой мощности рядом с резистором, который рассеивает большую мощность, может вывести маломощный резистор из строя даже при номинальной нагрузке последнего, так как данный резистор будет нагрет теплом, рассеиваемым мощным резистором.

Конденсаторы. В среднем отказы аппаратуры из-за дефектов конденсаторов составляют около 15% от общего числа отказов. Однако проведенные эксперименты показывают, что в условиях нормальной эксплуатации конденсаторы имеют большой срок службы.

Конденсаторы типа КБГ (бумажные герметизированные) предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока в диапазоне температур окружающей среды от —60 до +70° С при относительной влажности воздуха 98%. При работе конденсаторов в цепях, где на постоянное напряжение накладывается напряжение переменного тока, сумма постоянного и амплитуды переменного напряжений не должна превышать номинальной величины рабочего

Таблица 10

Номинальное напряжение, *в*	Допустимые напряжения переменного тока, *в* (действ.)	
	Номинальная емкость до 2 *мкф*	Номинальная емкость от 4 до 10 *мкф*
200	160	130
400	250	200
600	300	250
1 000	400	350
1 500	500	—

напряжения. При работе конденсаторов в цепи переменного тока (при отсутствии постоянного напряжения) допустимое рабочее напряжение снижается.

В табл. 10 приведены значения допустимого напряжения переменного тока при частоте 50 *гц* для конденсаторов КБГ.

Конденсаторы слюдяные герметические малогабаритные типа СГМ могут применяться в интервале температур от —60 до +80° С. Данные конденсаторы работают в цепях постоянного и переменного тока. Номинальное рабочее напряжение для различных видов конденсаторов составляет 250 *в*, 500 *в*, 550 *в*, 1 000 *в* и 1 500 *в*.

Конденсаторы электрические типа КЭ изготовляются на рабочие напряжения от 8 до 500 *в*. Они работают при постоянном или пульсирующем напряжении в интервале температур от —10÷—60 до +60° С при относительной влажности воздуха не выше 80%.

Указанные конденсаторы по условиям эксплуатации делятся на следующие группы: ОМ — особоморозостойкие от — 60 до +60° С; ПМ — с повышенной морозостойкостью от —50 до +60° С; М — морозостойкие от —40 до +60° С; Н — неморозостойкие от —10 до +60° С.

При работе конденсаторов в цепи пульсирующего тока амплитудное значение переменной составляющей напряжения частоты 50 *гц* не должно превышать значений, приведенных в табл. 11.

Таблица 11

Группа	Номинальное напряжение, *в*	Амплитудное значение переменной составляющей в % от номинального напряжения		
		2—20 *мкф*	30—100 *мкф*	свыше 100 *мкф*
ОМ, ПМ	До 50	25	15	8
	До 300	10	8	—
	400, 450	10	—	—
М, Н	До 50	15	10	5
	До 450	10	6	—
	500	10	—	—

Наиболее характерным для конденсаторов является изменение **их емкости и сопротивления** изоляции от температуры. Чрезвычайно чувствительны к температуре конденсаторы из керамики, имеющей большую величину диэлектрической проницаемости. Повышенная температура в ряде случаев нарушает герметичность герметизированных конденсаторов в результате объемного расширения пропиточных составов. Поэтому для конденсаторов, особенно электролитических, всегда нужно стремиться обеспечить такие условия работы, при которых температура воздуха вокруг них не превышала бы 0,8 допустимого значения в самых тяжелых условиях эксплуатации.

Электролитические конденсаторы нужно выбирать таким образом, чтобы нужная емкость сохранялась при самой низкой заданной температуре.

Трансформаторы и дроссели. При эксплуатации трансформаторов (дросселей) низкой частоты (силовых) температура их может

достигать значительной величины, порядка 50—60° С, а в некоторых случаях и выше. Выделяемое тепло необходимо интенсивно отводить, чтобы увеличить ресурс трансформатора (дросселя). Для этого нужно обеспечить эффективную конвекционную вентиляцию, так чтобы вокруг трансформатора не было тепловых экранов и обеспечивался бы свободный приток холодного и отвод теплого воздуха. Для лучшего теплорассеяния кожух трансформатора необходимо покрыть черной теплостойкой краской или лаком.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ НАГРУЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ

Коэффициент нагрузки элементов является одним из основных показателей, характеризующих надежность работы любой радиоэлектронной аппаратуры. Этот коэффициент показывает, какова в процентном отношении реальная нагрузка на данный элемент по сравнению с допустимой. Например, если резистор с допустимой мощностью рассеяния 2 *вт* рассеивает электрическую мощность 1 *вт*, то это соответствует коэффициенту нагрузки резистора по мощности, равному 0,5 (50%).

Когда коэффициенты нагрузки элементов близки к ста процентам или выше, надежность радиоаппаратуры, в которую входят данные элементы значительно снижается. Для того чтобы радиоаппаратура возможно дольше сохраняла свою работоспособность в различных условиях эксплуатации, коэффициент нагрузки элементов не должен повышать некоторого предельного значения. В табл. 12 приводятся рекомендуемые для радиолюбителей коэффициенты нагрузки некоторых радиоэлементов. Они справедливы для температуры окружающей среды не выше +60° С. При более высоких температурах данные коэффициенты следует снижать. Для малогабаритной аппаратуры коэффициенты нагрузки элементов могут быть повышены, но желательно, чтобы они не превышали единицы.

Таблица 12

Наименование элемента	Коэффициент нагрузки	Наименование элемента	Коэффициент нагрузки
Электронные лампы . .	0,7	Электролитические конденсаторы	0,7
Кремниевые триоды . .	0,8	Конденсаторы типа КД	0,8
Германиевые триоды . .	0,4	Резисторы УЛМ-0,12	0,6
Кремниевые диоды . . .	0,5	Резисторы УЛИ	0,7
Германиевые диоды . .	0,3	Резисторы МЛТ	0,65
Конденсаторы типа БМ	0,3	Резисторы пленочные углеродистые	0,5
Конденсаторы типа КБГ	0,5	Резисторы СПО	0,65
Конденсаторы типа МБМ	0,7	Резисторы ПЭВ	0,75
Конденсаторы типа МБГ	0,7	Резисторы проволочные	0,8
Конденсаторы типа КСО	0,8		
Конденсаторы типа СГМ	0,5		

Формулы для расчета коэффициентов нагрузки приведены на стр. 11. При расчетах учитывается коэффициент нагрузки по тому

параметру, который является главенствующим для исследуемой схемы.

Пример расчета надежности аппаратуры. В качестве примера рассмотрим упрощенный расчет надежности усилителя низкой частоты, схема которого приведена на рис. 24. Схему для удобства расчета разобьем на три блока. Первый блок — усилитель напряжения, второй — усилитель мощности, трегий — блок питания.

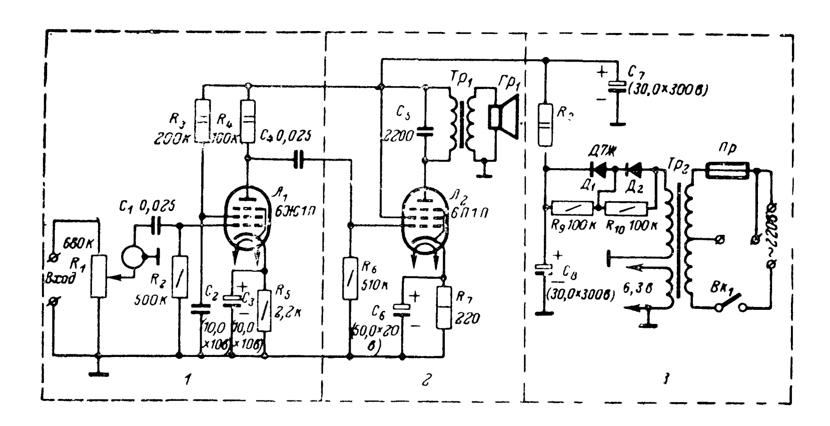


Рис. 24. Схема усилителя НЧ (R_8=3 *ком*).

Определим интенсивность отказов усилителя напряжения. Составим табл. 13, в которую внесем наименования элементов усилителя и исходные значения интенсивности отказов, взятые из приложения.

Таблица 13

Наименование и тип элементов (усилитель напряжения)	Число элементов n	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/*ч*	Произведение $n\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/*ч*
Лампа электронная $Л_1$	1	3,5	3,5
Конденсатор КБГ-И ($C_{1,2,4}$) . .	3	0,05	0,15
Конденсатор ЭМ (C_3)	1	0,035	0,035
Резистор СП-2 (R_1)	1	3,0	3,0
Резистор МЛТ (R_2, R_3, R_4, R_5)	4	0,03	0,12
		Итого	6,805

Суммируя найденные значения, получим:

$$\lambda_1 = 6{,}805 \cdot 10^{-6} \ 1/ч$$

(если усилитель работает в стационарных условиях, т. е. в наземной аппаратуре, полученные значения необходимо умножить на 10).

Определим интенсивность отказов усилителя мощности, составив табл. 14 так же, как составлялась табл. 13. Исходя из данных

Таблица 14

Наименование и тип элементов (усилитель мощности)	Число элементов n	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, $1/ч$	Произведение $n\lambda \cdot 10^{-6}$, $1/ч$
Лампа электронная ($Л_2$) . . .	1	4,0	4,0
Конденсатор КСО-3 (C_5) . . .	1	0,075	0,075
Конденсатор ЭМ (C_6)	1	0,035	0,035
Резистор МЛТ (R_6, R_7)	2	0,03	0,06
Трансформатор н. ч	1	0,02	0,02
Громкоговоритель	1	—	—
		Итого	4,09

табл. 14, интенсивность отказов усилителя мощности будет равна:

$$\lambda_2 = 4{,}09 \cdot 10^{-6}\ 1/ч.$$

Интенсивность отказов блока питания составит после суммирования значений интенсивности отказов входящих в него элементов (табл. 15) величину

$$\lambda_3 = 1{,}594 \cdot 10^{-6}\ 1/ч.$$

Таблица 15

Наименование и тип элементов (блок питания)	Число элементов n	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, $1/ч$	Произведение $n\lambda \cdot 10^{-6}$, $1/ч$
Диод Д7Ж	2	0,157	0,314
Резистор МЛТ (R_8, R_9, R_{10}) . .	3	0,03	0,09
Конденсатор КЭ-2 (C_7, C_8) . .	2	0,035	0,07
Трансформатор	1	0,5	0,5
Выключатель	1	0,06/к.	0,12
Предохранитель	1	0,5	0,5
		Итого	1,594

Интенсивность отказов всего усилителя равна сумме интенсивностей отказов составляющих его блоков (табл. 16):

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 12{,}489 \cdot 10^{-6}\ 1/ч$$

и после умножения на $a = 10$ составит $124{,}89 \cdot 10^{-6}\ 1/ч$.

Таблица 16

Наименование блоков	Интенсивность отказов $\Sigma\lambda \cdot 10^{-6}$, $1/ч$
Усилитель напряжения	6,805
Усилитель мощности	4,09
Выпрямитель (блок питания)	1,594
Итого	12,489

Вероятность безотказной работы усилителя для различных периодов времени эксплуатации определяется по формуле (4). Результаты вычислений по этой формуле приведены в табл. 17. При расчете принимались нормальные условия эксплуатации, т. е. электрический режим и температура окружающей среды находились в пределах допустимых значений.

Таблица 17

Время t, ч	0	50	100	200	300	500
λt	0	0,003	0,012	0,025	0,037	0,062
Вероятность безотказной работы P_0 (t)	1	0,994	0,988	0,975	0,963	0,939

Интенсивность отказов элементов, для которых нет справочных данных о влиянии режима эксплуатации, принимается равной тем, которые имеют место в номинальном режиме.

КОНСТРУКТИВНАЯ НАДЕЖНОСТЬ РАДИОАППАРАТУРЫ

Конструктивная надежность радиоустройства не менее важна, чем электрическая.

К конструктивной надежности относятся вопросы надежности и прочности конструктивных узлов радиоустройств, а также частные вопросы, связанные с применением в разрабатываемой аппаратуре различных механических устройств (двигателей, сельсинов, кинематических узлов).

Низкая конструктивная надежность радиоаппаратуры обычно является следствием таких причин, как применение материалов, механическая, термическая и электрическая прочность которых не удовлетворяет заданным условиям эксплуатации, или размещение деталей на шасси без учета их температурных режимов. Такими причинами являются, например, размещение электролитического конденсатора или полупроводникового прибора рядом с деталями, выделяющими большое количество тепла (лампами, мощными резисторами), использование для монтажа очень тонких одножильных проводов, небрежная пайка и близкое расположение токонесущих проводников в высоковольтных выпрямителях.

Конструктивная надежность малогабаритных транзисторных устройств (особенно переносных) в первую очередь определяется надежностью крепления на печатной плате наиболее крупных деталей — трансформаторов, переключателей, потенциометров, переменных конденсаторов.

Совершенно недопустимо крепить эти детали только за выводы с помощью паек. Каждая деталь должна быть укреплена на плате специальной крепежной скобой, винтами, с помощью клея, или другими способами, но таким образом, чтобы электрические выводы ее не несли никаких механических нагрузок.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ АППАРАТУРЫ

Надежность является одним из важнейших параметров аппаратуры, ее неотъемлемым свойством, имеющим не меньшее значение, чем такие параметры, как мощность, чувствительность, коэффициент усиления, качество звучания, точность работы. Поэтому при разработке схемы и в процессе изготовления аппаратуры радиолюбитель в первую очередь должен оценить степень ее надежности.

Ниже приводятся наиболее характерные методы повышения надежности работы радиоустройств.

Выход из строя радиоаппаратуры вызывается отказом в работе какой-либо детали — радиолампы, резистора, конденсатора, реле, переключателя, трансформатора и т. п. Поэтому надежность всего прибора в целом определяется в значительной степени надежностью комплектующих элементов. В связи с этим для повышения надежности радиоаппаратуры следует применять высоконадежные радиодетали с большим ресурсом. Это особенно необходимо при конструировании сложных устройств, содержащих большое количество радиоэлементов. Чем сложнее аппаратура, чем больше элементов она содержит, тем ниже при прочих равных условиях ее надежность. Искусство конструктора состоит в том, чтобы созданная им аппаратура отвечала заданным техническим требованиям и была максимально простой.

Любые отступления режимов работы от рекомендуемых для радиоламп и других элементов — применение повышенных (или в ряде случаев пониженных) напряжений и превышение предельных токов, работа при высоких или чрезмерно низких температурах, высокая влажность и значительные механические нагрузки — ведут к преждевременному выходу аппаратуры из строя. Поэтому при расчете схем необходимо обратить особое внимание на соблюдение паспортных (справочных) режимов применяемых элементов.

Наличие контрольно-измерительной аппаратуры как встроенной в блоки, так и придаваемой к ним является обязательным условием грамотной эксплуатации современных сложных радиоэлектронных устройств.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Интенсивности отказов элементов радиоаппаратуры (по данным национальных симпозиумов США 1961, 1962, 1963 гг.)

Наименование элементов	Интенсивности отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$ 1/*ч*		
	максимальная	средняя	минимальная
Аккумуляторы	19,3	7,2	0,35
Антенны	3,52	0,36	0,2
Батареи однозарядные	300,0	30,0	5,0
Выводы высокочастотные	4,22	2,63	1,131
Выключатели рычажные типа тумблер	0,123/к	0,06/к	0,015/к
Выпрямители селеновые	1,6	0,76	0,26
Генераторы звуковой частоты	0,56	0,35	0,14
Головки магнитной записи и стирания	1,9	0,98	0,13
Двигатели асинхронные	11,2	8,6	4,49
Двигатели синхронные	6,25	0,359	0,159
Диоды германиевые	0,678	0,157	0,02
Диоды кремниевые	0,452	0,2	0,021
Дроссели	2,22	0,34	0,07
Дроссели анодные	0,091	0,02	0,005
Дроссели низкочастотные	0,28	0,175	0,07
Зажимы	0,0009	0,0005	0,0003
Изоляторы	1,54	0,05	0,03
Кабели	2,2	0,475	0,002
Катушки высокочастотные	0,05	0,01	0,005
Катушки фильтров	0,25	0,03	0,012
Катушки индуктивности	1,018	0,02	0,099
Катушки индуктивности отклоняющие			
Катушки индуктивности фокусирую-	0,33	0,025	0,02
щие	0,068	0,05	0,025
Конденсаторы бумажные	0,29	0,05	0,003
Конденсаторы бумажные, менее 600 *в*	0,04	0,025	0,01
Конденсаторы бумажные, выше 600 *в*	0,235	0,09	0,0083
Конденсаторы воздушные переменные	0,082	0,034	0,01
Конденсаторы керамические	1,64	0,15	0,042
Конденсаторы керамические переменные	0,351	0,02	0,012
Конденсаторы постоянные, выше 1 000 *в*	2,385	0,325	0,132
Конденсаторы слюдяные	0,132	0,075	0,005
Конденсаторы танталовые	1,934	0,6	0,103
Конденсаторы электролитические	0,513	0,035	0,003
Кристаллы (кварцы) высокочастотные	0,6	0,2	0,03
Лампы накаливания	1,18	0,64	0,1
Лампы неоновые тлеющего разряда	1,52	0,1	0,019
Панели электронных ламп	0,009/г.	0,005/г.	0,002/г.
Переключатели	1,14	0,05	0,09
Потенциометры микроминиатюрные проволочные	2,0	1,2	0,62
Потенциометры проволочные	2,05	1,4	0,137

Наименование элементов	Интенсивности отказов, $\lambda\cdot10^{-6}$ 1/ч		
	максимальная	средняя	минимальная
Потенциометры угольные	4,44	0,24	0,1
Предохранители плавкие	2,75	0,5	0,001
Провода соединительные между элементами	0,12	0,015	0,008
Проводники	0,436	0,019	0,003
Разъемы штепсельные для блоков	0,90	0,163	0,10
Реле высокочувствительные	0,57/к.г.	0,4/к.г.	0,03/к.г.
Реле малогабаритные	0,54/к.г.	0,25/к.г.	0,145/к.г.
Реле мощные	4,1/к.г.	0,3/к.г.	0,15/к.г.
Реле термические	1,0/к.г.	0,4/к.г.	0,12/к.г.
Резисторы композиционные	0,297	0,043	0,005
Резисторы металлопленочные	0,4	0,004	0,004
Резисторы постоянные	0,07	0,03	0,01
Резисторы проволочные	0,197	0,087	0,046
Резисторы проволочные мощные	0,076	0,04	0,021
Резисторы проволочные переменные	0,807	0,091	0,02
Резисторы угольные	0,888	0,045	0,005
Сельсины	0,61	0,35	0,09
Схемы блоков высокой частоты	2,43	1,4	0,37
Схемы блоков промежуточной частоты	1,06	0,4	0,26
Схемы генерации импульсов высокого напряжения	4,52	1,75	0,611
Счетчики электрические	5,66	0,036	0,005
Терморезисторы	1,4	0,6	0,2
Транзисторы германиевые	1,91	0,9	0,6
Транзисторы германиевые мощные	1,4	0,6	0,33
Транзисторы кремниевые	1,44	0,5	0,27
Транзисторы кремниевые средней мощности	0,84	0,74	0,21
Трансформаторы анодные	0,052	0,025	0,012
Трансформаторы входные	2,08	1,09	0,12
Трансформаторы выходные	0,2	0,09	0,04
Трансформаторы высокочастотные	0,062	0,045	0,019
Трансформаторы звуковой частоты	0,04	0,02	0,01
Трансформаторы накала	0,06	0,027	0,013
Трансформаторы силовые	1,69	0,5	0,03
Трансформаторы промежуточной ча-		0,08	0,02
стоты	0,31	3,11	1,02
Усилители сигналов	8,55		
Фильтры	1,62	0,79	0,01
Шасси	—	0,921	—
Экраны высокочастотные	0,15	0,09	0,03
Экраны ламповые	0,04	0,02	0,005
Электродвигатели переменного тока	9,36	5,24	1,12
Электродвигатели постоянного тока	—	9,36	—
Электронные лампы миниатюрные	15,8	1,9	0,55
Электронные лампы мощные	25,0	10,0	0,17

Наименование элементов	Интенсивности отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$ 1/ч		
	максимальная	средняя	минимальная
Электронные лампы передающие . .	175,0	58,2	3,8
Электронные лампы приемные . . .	7,5	2,5	1,1
Электронные лампы повышенной надежности	2,76	1,5	0,88
Электронные лампы приемо-передающие	11,0	5,0	2,1
Электронные лампы усилители мощности общего назначения	40,0	20,0	12,0
Диоды общего назначения одиночные	2,5	0,8	0,24
Диоды общего назначения двойные, 1/2	2,0	0,8	0,32
Диоды типа 6AL5 двойные	1,5	0,4	0,3
Кенотроны высоковольтные 2X2A . .	—	4,88	—
Кенотроны типа 1B3	—	0,67	—
Кенотроны 6X4 двойные диоды . . .	4,7	2,5	0,9
Кенотроны 6X5 двойные диоды . . .	14,62	11,5	7,91
Триоды общего назначения одиночные	3,86	1,3	0,67
Триоды общего назначения двойные, 1/2	2,0	0,91	0,23
Триоды типа 2C51	1,5	0,6	0,5
Триоды типа 6AS7G выходные . . .	2,8	1,2	1,0
Триоды типа 6SL7, усилители н. ч. .	1,3	0,6	0,4
Тетроды общего назначения	3,9	1,8	0,88
Тетроды повышенной надежности . .	2,5	1,6	0,68
Тетроды типа 5933	2,7	1,82	1,28
Тетроды типа 6AG5, усилители н. ч.	1,1	0,5	0,4
Тетроды типа 6L6, лучевые	3,29	2,8	1,37
Пентоды общего назначения	3,86	2,5	0,73
Пентоды повышенной надежности . .	2,8	1,6	0,79
Пентоды, усилители в. ч.	2,1	0,9	0,7
Пентоды 6AG7 мощные	2,4	1,0	0,9
Пентоды типа 6AH6, усилители в. ч.	2,78	2,6	1,15
Пентоды типа 6AK5, усилители в. ч.	5,81	3,5	1,25
Пентоды типа 6AG5, усилители в. ч.	4,73	4,0	1,07
Пентоды типа 6AS6, усилители в. ч. и п. ч.	1,0	0,4	0,3
Пентоды типа 6AИ6, усилители в. ч. и п. ч.	2,0	1,3	0,4
Пентоды типа 6BA6, усилители в. ч. и п. ч.	1,4	0,6	0,5
Пентоды типа 9003, усилители в. ч.	1,7	0,7	0,62
Гептоды типа 6BE6, преобразователи	1,4	0,6	0,4
Тиратроны типа 884	—	53,0	—
Тиратроны типа 3C45	20,4	14,0	6,71
Индикаторы настройки 6E5	—	0,6	—

Наименование элементов	Интенсивности отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч		
	максимальная	средняя	минимальная
Стабилизаторы напряжения ОВ2 . .	2,5	1,0	0,4
Электроннолучевые трубки с электростатическим отклонением	2,0	1,0	0,96
Электроннолучевые трубки с магнитным отклонением	3,1	1,65	0,94

Примечание. Некоторые значения интенсивностей отказов под дробной чертой имеют наименование: к. (контакт), г. (гнездо), к. г. (контактная группа). Для получения суммарной величины интенсивности отказа нужно табличное значение умножить на число данных деталей в элементе.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения e^x для x от 0,000 до 8,9

x	Для x от 0,000 до 0,099									
	0	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,00	1,0000	0,9990	0,9980	0,8870	0,9960	0,9950	0,9940	0,9930	0,9920	0,9910
0,01	0,9900	0,9891	0,9881	0,9871	0,9861	0,9851	0,9841	0,9831	0,9822	0,9812
0,02	0,9802	0,9792	0,9782	0,9773	0,9763	0,9753	0,9743	0,9734	0,9724	0,9714
0,03	0,9704	0,9695	0,9685	0,9675	0,9666	0,9656	0,9646	0,9637	0,9627	0,9618
0,04	0,9608	0,9598	0,9589	0,9579	0,9570	0,9560	0,9550	0,9541	0,9531	0,9522
0,05	0,9512	0,9502	0,9493	0,9484	0,9474	0,9465	0,9455	0,9446	0,9436	0,9427
0,06	0,9418	0,9408	0,9399	0,9389	0,9380	0,9371	0,9361	0,9352	0,9343	0,9333
0,07	0,9324	0,9315	0,9305	0,9296	0,9287	0,9277	0,9268	0,9259	0,9250	0,9240
0,08	0,9231	0,9222	0,9213	0,9204	0,9194	0,9185	0,9176	0,9167	0,9158	0,9148
0,09	0,9139	0,9130	0,9121	0,9120	0,9103	0,9094	0,9085	0,9076	0,9066	0,9057

Продолжение приложения 2

x	Для x от 0,10 до 1,49									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,9048	0,8958	0,8869	0,8781	0,8694	0,8607	0,8521	0,8437	0,8353	0,8270
0,2	0,8187	0,8106	0,8025	0,7945	0,7866	0,7788	0,7711	0,7634	0,7558	0,7483
0,3	0,7408	0,7334	0,7261	0,7189	0,7118	0,7047	0,6977	0,6907	0,6839	0,6771
0,4	0,6703	0,6637	0,6570	0,6505	0,6440	0,6376	0,6313	0,6250	0,6188	0,6126

Продолжение приложения 2

x	Для *x* от 0,10 до 1,49									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	0,6065	0,6005	0,5945	0,5886	0,5827	0,5769	0,5712	0,5655	0,5599	0,5543
0,6	0,5488	0,5434	0,5379	0,5326	0,5273	0,5220	0,5169	0,5117	0,5066	0,5016
0,7	0,4966	0,4916	0,4868	0,4819	0,4771	0,4724	0,4677	0,4630	0,4584	0,4538
0,8	0,4493	0,4449	0,4404	0,4360	0,4317	0,4274	0,4232	0,4190	0,4148	0,4107
0,9	0,4066	0,4025	0,3985	0,3946	0,3906	0,3867	0,3829	0,3791	0,3753	0,3716
1,0	0,3679	0,3642	0,3606	0,3570	0,3535	0,3479	0,3465	0,3430	0,3396	0,3362
1,1	0,3329	0,3296	0,3263	0,3230	0,3198	0,3166	0,3135	0,3104	0,3073	0,3042
1,2	0,3012	0,2982	0,2952	0,2923	0,2894	0,2865	0,2837	0,2808	0,2780	0,2753
1,3	0,2725	0,2698	0,2671	0,2645	0,2618	0,2592	0,2567	0,2541	0,2616	0,2491
1,4	0,2466	0,2441	0,2417	0,2393	0,2369	0,2346	0,2322	0,2299	0,2276	0,2254

Продолжение приложения 2

x	Для *x* от 1,5 до 2,99									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,5	0,2231	0,2229	0,2187	0,2165	0,2144	0,2122	0,2101	0,2080	0,2060	0,2039
1,6	0,2019	0,1999	0,1979	0,1959	0,1940	0,1920	0,10901	0,1882	0,1864	0,1845
1,7	0,1827	0,1809	0,1791	0,1773	0,1775	0,1738	0,1720	0,1703	0,1686	0,1670
1,8	0,1653	0,1637	0,1620	0,1604	0,1588	0,1572	0,1557	0,1541	0,1526	0,1511
1,9	0,1496	0,1481	0,1466	0,1451	0,1437	0,1423	0,1409	0,1395	0,1381	0,1367

x	Для x от 1,5 до 2,99									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
2,0	0,1353	0,1340	0,1327	0,1313	0,1300	0,1287	0,1275	0,1262	0,1249	0,1237
2,1	0,1225	0,1212	0,1200	0,1188	0,1177	0,1165	0,1153	0,1142	0,1130	0,1119
2,2	0,1108	0,1097	0,1086	0,1075	0,1065	0,1054	0,1044	0,1033	0,1023	0,1013
2,3	0,1003	0,0993	0,0983	0,0973	0,0963	0,0954	0,0944	0,0935	0,0926	0,0916
2,4	0,0907	0,0898	0,0889	0,0880	0,0872	0,0863	0,0854	0,0846	0,037	0,0829
2,5	0,0821	0,0813	0,0805	0,0797	0,0781	0,0773	0,0765	0,0765	0,0758	0,0750
2,6	0,0743	0,0735	0,0728	0,0721	0,0714	0,0707	0,0699	0,0693	0,0686	0,0679
2,7	0,0672	0,0665	0,0659	0,0652	0,0646	0,0639	0,0633	0,0627	0,0620	0,0614
2,8	0,0608	0,0602	0,0596	0,0590	0,0584	0,0578	0,0573	0,0567	0,0561	0,0556
2,9	0,0550	0,0545	0,0539	0,0534	0,0529	0,0523	0,0518	0,0513	0,0508	0,0503

Продолжение приложения 2

x	Для x от 3,0 до 8,9									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
3	0,0498	0,0450	0,0408	0,0368	0,0334	0,0302	0,0273	0,0247	0,0224	0,0222
4	0,0183	0,0166	0,0150	0,0136	0,0123	0,0111	0,0101	0,0091	0,0082	0,0074
5	0,0067	0,0061	0,0055	0,0050	0,0045	0,0041	0,0037	0,0033	0,0030	0,0027
6	0,0025	0,0022	0,0020	0,0018	0,0017	0,0015	0,0014	0,0012	0,0011	0,0010
7	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004
8	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001

Литература

Астафьев А. В., Окружающая среда и надежность, Госэнергоиздат, 1959.

Вентцель Е. С., Теория вероятностей, Физматгиз, 1958.

Показатели надежности современных элементов и частей систем, ЛЭТИ, 1964 (учебное пособие).

Гнеденко Б. В., Курс теории вероятностей, Физматгиз, 1961

Павлыченко А. Д. и др., Надежность радиоэлектронной аппаратуры, изд-во «Советское радио», 1963.

Хинней К., Уолш К., Радиодетали и проблема их надежности, изд-во «Советское радио», 1960.

Теория надежности в области радиоэлектроники (терминология), Изд-во АН СССР, 1963.

Надежность радиоэлектронной аппаратуры, Сб. статей, изд-во «Советское радио», 1960.

Electronic Design, № 11, 12, 1961.

Toute L'Electronique. № 305, 1966.

ОГЛАВЛЕНИЕ

13 коп.